

ZAVRŠNI RAD

**PRIMJENA ADITIVNE PROIZVODNJE U PROCESU RAZVOJA
NOVIH PROIZVODA**

Filip Jurman

PULA, rujan 2017.

ZAVRŠNI RAD

**PRIMJENA ADITIVNE PROIZVODNJE U PROCESU RAZVOJA
NOVIH PROIZVODA**

Kolegij: Konstrukcije

Student: Filip Jurman

Mentor: Milenko Jokić, dipl. ing., pred.

PULA, rujan 2017.

ZAHVALA:

Zahvaljujem se svome mentoru Milenku Jokiću, dipl. ing., pred., na vremenu i stručnim savjetima i Domagoju Maričaku, struč. spec. oec., na savjetima za rješavanje problema dizajna proizvoda koje je bilo neophodno pri izradi završnog rada.

Ujedno bih se zahvalio svojim kolegama Marinu Učeta, Leonu Garbacu i Amelu Šakanoviću sa kojima sam tijekom studiranja imao zadovoljstvo raditi.

Na kraju zahvalio bih se mom bratu Ivanu Grmuši i svojoj djevojci Ani Jovanović koji su me inspirirali i poticali tijekom procesa studiranja kao i Berminu Puljiću i Luki Brstilu na potpori. Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima.

IZJAVA O SAMOSTALNOSTI IZRADE ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da sam završni rad pod nazivom „**Primjena aditivne proizvodnje u procesu razvoja novih proizvoda**“ samostalno izradio uz pomoć mentora Milenka Jokića, dipl. ing., pred., koristeći stručnu literaturu i znanje stečeno tijekom studiranja.

Rad je pisan u duhu hrvatskog jezika i u skladu sa pravilnikom o završnom radu na stručnom studiju politehnike.

Student: Filip Jurman

Potpis: _____

SAŽETAK

Suvremeno tržište postavlja vrlo visoke zahtjeve pred proizvođače različitih vrsta proizvoda. Očekuje se da proizvodi budu što jeftiniji i što kvalitetniji, te da budu proizvedeni u što kraćem vremenskom periodu. U cilju postizanja optimalnog rješenja, brza izrada funkcionalnog prototipa može imati ključnu ulogu. Osim u samoj proizvodnji, primjena aditivne tehnologije danas ima vrlo veliku primjenu u procesu razvoja novih proizvoda.

Ključne riječi: Aditivna proizvodnja, aditivna tehnologija, prototip, funkcionalni prototip, 3D printer.

ABSTRACT

The modern market has put high standards towards manufacturers of different types of products. It is expected that the products are going to be cheaper and better quality while the producing time will be short as possible. In order to achieve the most optimal solution, the quick design of a functional prototype can play a key role. Apart from the production itself, the application of additive technology today has a very large application in the process of developing new products.

Keywords: Additive manufacturing, additive technology, prototype, functional prototype, 3D printer.

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
1.1 Opis i definicija problema.....	1
1.2 Cilj i svrha rada	1
1.3 Hipoteza rada	1
1.4 Metode rada	2
1.5 Struktura rada.....	2
2. RAZVOJ ADITIVNE PROIZVODNJE	3
3. SISTEMATIZACIJA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA	7
3.1 Stereolitografija.....	8
3.2 Selektivno lasersko srašćivanje.....	10
3.3 3D tiskanje	12
3.4 Taložno očvršćivanje	13
3.5 Izrada objekata laminiranjem.....	15
3.6 Selektivno lasersko taljenje.....	17
3.7 Taljenje s pomoću snopa elektrona.....	19
4. SISTEMATIZACIJA KORIŠTENIH MATERIJALA U ADITIVNOJ PROIZVODNJI.....	22
4.1 Metali	24
4.2 Keramika.....	24
4.3 Biomaterijali	24
4.4 Polimeri.....	25
4.4.1 Plastomeri	25
4.4.3 Elastomeri	26
5. PODRUČJA PRIMJENE ADITIVNE PROIZVODNJE.....	27
5.1 Primjena u medicini	27

5.2 Primjena u zrakoplovnoj industriji.....	29
5.3 Primjena aditivne proizvodnje u automobilske industriji.....	30
6. POSTUPAK IZRADE DIJELOVA PRIMJENOM ADITIVNE PROIZVODNJE.....	31
7. PRAKTIČNI PRIMJER – IZRADA KUĆIŠTA USB PRIJENOSNE MEMORIJE	34
7.1 Izrada CAD modela	35
7.2 Izrada dijelova kućišta pomoću Ultimaker 2 extended+ printera	37
8. ZAKLJUČAK	43
LITERATURA	44
POPIS SLIKA I TABLICA	46

1. UVOD

Napretkom računalne tehnologije, modernizacijom inženjerske prakse, te razvojem suvremenih alata razvijaju se i novi načini izrade prototipa u svrhu veće točnosti i proizvodnje što optimalnijeg proizvoda sa što manjom konzumacijom vremena.

U ovome radu su opisani osnovni postupci i tehnologije aditivne proizvodnje. Dan je pregled najkorištenijih materijala u procesu izrade, te je u kratko opisana primjena aditivne proizvodnje u različitim granama industrije. U praktičnom dijelu rada prikazan je postupak izrade kućišta USB prijenosne memorije pomoću 3D printera „Ultimaker 2 Extended+“.

1.1 Opis i definicija problema

Brza izrada funkcionalnog prototipa, kao i izrada 3D modela dijela u svrhu prezentacije imaju jako veliku važnost u procesu razvoja novih proizvoda. Osim toga, trendovi pokazuju sve veću primjenu aditivne proizvodnje u maloserijskoj, serijskoj, i visoko serijskoj proizvodnji. Zadaća je inženjera budućnosti pratiti razvoj novih tehnologija, te biti upoznat sa mogućnostima njihove primjene.

1.2 Cilj i svrha rada

Cilj rada je dati pregled razvoja i primjene aditivne proizvodnje u različitim granama industrije, te na praktičnom primjeru definirati osnovne faze izrade određenog dijela-proizvoda primjenom aditivne tehnologije. Svrha rada je primjenom CAD programskog sustava i 3D printera izraditi funkcionalni prototip – kućište USB prijenosne memorije.

1.3 Hipoteza rada

Korištenjem CAD/CAM programskog sustava i 3D printera, uz uvažavanje osnovnih načela konstruiranja, može se proizvesti prototip ali i potpuno funkcionalni proizvod.

1.4 Metode rada

Korištene znanstvene metode u izradi završnog rada: metoda deksripcije, analize, sinteze, grafička metoda.

1.5 Struktura rada

Rad je podijeljen u osam poglavlja sa pripadajućim potpoglavljima.

U prvom poglavlju prikazan je uvod u sadržaj završnog rada.

U drugom poglavlju izlaže se sažeti povijesni pregled aditivne proizvodnje i sam razvoj iste u kronološkom redoslijedu.

U trećem poglavlju opisane su različite aditivne tehnologije i objašnjeni su postupci izrade u sistematiziranom redoslijedu.

Četvrto poglavlje prikazuje sistematiziran pregled korištenih materijala te njihov opis.

Peto poglavlje daje pregled područja primjene aditivne proizvodnje za različite vrste aditivnih tehnologija.

U šestom poglavlju su definirane osnovne faze izrade dijelova primjenom aditivne proizvodnje.

U sedmom poglavlju je prikazan i opisan postupak izrade praktičnog primjera – kućišta USB prijenosne memorije.

U osmom poglavlju iznesen je zaključak i osvrt na završni rad.

2. RAZVOJ ADITIVNE PROIZVODNJE

2009. godine definiran je pojam aditivne proizvodnje (engl. „*Additive Manufacturing*“) kao krovni termin sa strane međunarodne komisije *ASTM International Committee f42*. U brojnim literaturama susreću se i termini aditivni procesi, aditivni postupci, slojevita proizvodnja, i drugi. Aditivna proizvodnja odgovor je na dinamiku današnje industrije, te je interdisciplinarni proces. Prema autorima Šercer i Godec razvitak aditivne proizvodnje proizlazi iz suradnje stručnjaka iz različitih polja pri izvršavanju zajedničkih projekata. „Uz interdisciplinarnost, koja zahtijeva maksimalno iskorištavanje potencijala postupaka aditivne proizvodnje, ne smije se smetnuti s uma ni odgovarajuće obrazovanje budućih stručnjaka, koji će inovativnim i kreativnim idejama pomicati granice mogućnosti razvoja i proizvodnje novih proizvoda. Takve pomake mogu im omogućiti jedino postupci aditivne proizvodnje.“¹

U ovom dijelu rada kronološki će se prikazati kratki presjek najvažnijih događaja na području aditivne proizvodnje od samih početaka do prve komercijalizacije

„Prvi pokušaj stvaranja čvrstih objekata pomoću fotopolimera i laserske tehnologije dogodio se kasnih šezdesetih godina prošloga stoljeća u „Battelle Memorial“ institutu. Eksperiment je uključivao presijecanje dviju laserskih zraka različitih valnih duljina u sredini posude smole, pokušavajući polimerizirati materijal na mjestu križanja zraka. Fotopolimerna smola koja se koristila u procesu izumljena je 1950-tih sa strane tvrtke DuPont.“²

1967. godine Wyn K. Swainson aplicira se za patent pod nazivom „Metode iz 3D objekta pomoću holografije“ (engl. „*Method of Producing a 3D Figure by Holography*“) primjenjujući postupak sa dvostrukim laserom izvedenim 1950-tih godina. Krajem 1970-tih, Dynell Electronics Corp.-u dodijeljen je niz patenata za čvrstu fotografiju. Izum je uključivao rezanje poprečnih presjeka računalnom kontrolom, koristeći glodalicu ili laser, te spremanje u registar kako bi se stvorio 3D objekt.³

Hideo Kodama iz Instituta za industrijski općinski institut u Nagoyi (Nagoyya, Japan) među prvima je izmislio jedno-zračno lasersko stvrdnjavanje, prema različitim izvorima. U svibnju 1980. godine prijavio se za patent u Japanu, no rok je istekao prije nego što je prijava

¹ Godec D, Šercer M; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str 2.

² Wohlers T.; Garnett T.; **History of additive manufacturing**; Wohlers Associates, INC.; 2014.

³ Wohlers T.; **Rapid prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry**; Wohlers Associates, INC; 2005., str. 1. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2015/NIST.IR.8059.pdf> (25. 08. 2017.)

i sam rad preuzet na pregled. U listopadu iste godine, Kodama izdaje rad pod nazivom „Three-Dimensional Data Display by Automatic Preparation of a Three-Dimensional Model“ koje u detaljnosti ističe njegov rad. Njegovi eksperimenti su se sastojali od projiciranja UV zraka i fotosenzibilne smole nazvane Tevistar, kojeg proizvodi Teijin. Metoda je uključivala crno-bijeli film koji služi za maskiranje i kontrolu područja ekspozicije, što odgovara svakom presjeku. U radu se također raspravlja o upotrebi uređaja x-y plotera i optičkih vlakana kako bi se isporučio mjesto UV svjetla. CMET je koristio verziju ove tehnike u strojevima SOUP 530, 600 i 850.

Kodama je u studenom 1981. objavio drugi članak, pod nazivom Automatska metoda za izradu trodimenzionalnog plastičnog modela s polimerom foto-očvršćivanjem (engl. „*Automatic Method for Fabricating a Three-Dimensional Plastic Model with PhotoHardening Polymer*“). Kodama opisuje tri osnovne tehnike koje je koristio za izradu plastičnih dijelova skrutnjivanjem tankih, uzastopnih slojeva fotopolimera. U radu, Kodama tvrdi: "Ako se skrućeni sloj uranja u tekućinu s vrhom na dubini jednakoj debljini sloja koji se skrutne, njezina gornja površina prekrivena je tekućim polimerom", koji u osnovi opisuje ključni element stereolitografskog procesa.⁴

U kolovozu 1982., Alan Herbert iz 3M Laboratorija za sektor grafičkih tehnologija objavio je rad pod nazivom „Solid Object Generation“ u časopisu „Journal of Applied Photographic Engineering“. U ovom radu Herbert je opisao sustav koji usmjerava lasersku zračnu zonu argona na površinu fotopolimera pomoću sustava zrcala povezanog s uređajem x-y plotera. S tim sustavom Herbert je uspio stvoriti nekoliko manjih, osnovnih oblika. Međutim prema Herbertu, primarna svrha rada bila je razviti razumijevanje za zahtjeve stvarnog sustava.

U srpnju 1984., Jean-Claude Andre s francuskim Nacionalnim centrom za znanstveni rad (engl. „*National Center for Scientific Research*“) u Nancyu u Francuskoj i kolegama koji rade za Francusku tvrtku Cilas Alcatel Industrial Laser Company, podnijeli su patent pod nazivom „Apparatus for Fabricating a Model of an Industrial Part“, koji uključuje laserski pristup s jednim snopom svjetla. Francuski patent je odobren u siječnju 1986.. Laser 3D

⁴ Wholers T.; **Rapid prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry**; Wohlers Associates, INC; 2005., str. 28. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2015/NIST.IR.8059.pdf> (25. 08. 2017.)

nastojao je napraviti tehniku opisanu u patentu komercijalno dostupnom na usluzi bez planova prodaje sustava.⁵

1987. godine američka tvrtka „3D systems“ razvija stereolitografiju, čime započinje i razvoj postupaka aditivne proizvodnje. Postupak je definiran očvršćivanjem fotopolimera u tankim slojevima uzrokovano djelovanjem ultraljubičastog zračenja putem lasera. Sukladno tome, SLA-1 bio je prvi komercijalno raspoloživi sustav za aditivnu proizvodnju.⁶

Selektivno lasersko srašćivanje (engl. „*Selective Laser Sintering*“) na tržište se pojavljuje 1992. godine, gdje se kao pioniri iskazuju tvrtke DTM (kupljena sa strane 3D systems) te Teijin Seiki.⁷

„Godine 1996. tvrtka *Stratasys* predstavila je uređaj *Genysis*, koji je radio prema načelima postupka ekstrudiranja, slično kao i FDM postupak, no temeljio se na aditivnom procesu razvijenom u IMB Watson Research Center. Nakon osam godina proizvodnje i prodaje sustava za stereolitografiju tvrtka 3D Systems plasirala je na tržište svoj prvi 3D pisac (Actua 2100) s ink-jet mehanizmom.“⁸ Također autori Šercer i Goder⁹ navode kako tvrtka Z Corporation na tržište predstavlja vlastiti pisac Z402 3D, koji se temeljio na 3D tiskanju modela od praškastih materijala na bazi gipsa i škroba i kapljevito veziva na bazi vode.

Potom tvrtka BPM Technology komercijalizira sustav za postupak balističkog oblikovanja (engl. „*Ballistic Particle Manufacturing*“). Postupak je temeljen na principu nanošenja voska uz pomoć ink-jet glave pisca. Iste godine pojavljuju se i pisaci azijskih poduzeća koje se temelje na LOM postupku.

1997. godine osniva se tvrtka AeroMet, te razvija sustav koji koristi laser visoke snage te srašćuje dodane čestice koje se koriste za izradu proizvoda od titanovih legura, tj. laserska aditivna proizvodnja (engl. „*Laser Additive Manufacturing*“).“ Do napuštanja tog projekta u prosincu 2005. godine AeroMet je proizvodio dijelove za zrakoplovnu industriju kao pružatelj usluga.“¹⁰

⁵ Wholers T.; **Rapid prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry**; Wohlers Associates, INC; 2005., str. 1.-str. 2.; <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2015/NIST.IR.8059.pdf> (25. 08. 2017.)

⁶ Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 3.

⁷ Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 4.

⁸ Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 5.

⁹ Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 5.

¹⁰ Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 5.

2002. godine francuska tvrtka Phenix Systems prodaje uređaj Phenix 900, uređaj koji koristi postupak srašćivanja keramike i metala u čvrstoj fazi.

2004. tvrtka Object Geometris predstavlja seriju neprozirnih materijala u boji pod nazivom Vero FullCure 800, koji omogućuju postizanje boljih mehaničkih svojstva kod proizvoda te pruža kvalitetniju vizualizaciju detalja na istim. Također iste godine tvrtka 3D Systems prodaje uređaj InVision HR, uređaj visoke razlučivosti koji pogađa ciljano tržište draguljara. Tvrtka DSM Somos predstavlja noanokompozitne materijale, materijale visoke istezljivosti, materijale postojane na trošenje, samogasive materijale UL94 V0 i toplinski postojane materijale za aditivnu proizvodnju temeljenu na slojevima.¹¹

Potom tvrtka Optomec objavljuje novu glavu za širokokutno raspršivanje Aerosol Jet kojoj je namjena ispisivanje 3D i konformne elektronike u lipnju 2011. godine. Iako je poznata uglavnom u industriji aditivne proizvodnje za „LENS“ opremu, Optomecov Aerosol Jet ispis proizašao je iz DARPA-inog programa pod imenom Mesoscopic Integrated Conformal Electronics. Svrha namjene jest korištenje za tisak 3D elektronike, solarnih ćelija i zaslona.¹²

U ožujku 2013. godine švedska tvrtka Arcam objavljuje stroj Arcam Q10. Materialise najavljuje HeartPrint servis uz pomoć kojega se može printati specifične kardiovaskularne modele po mjeri pacijenta koji se koriste u pred-operativnom planiranju i pri testiranju medicinskih uređaja.¹³

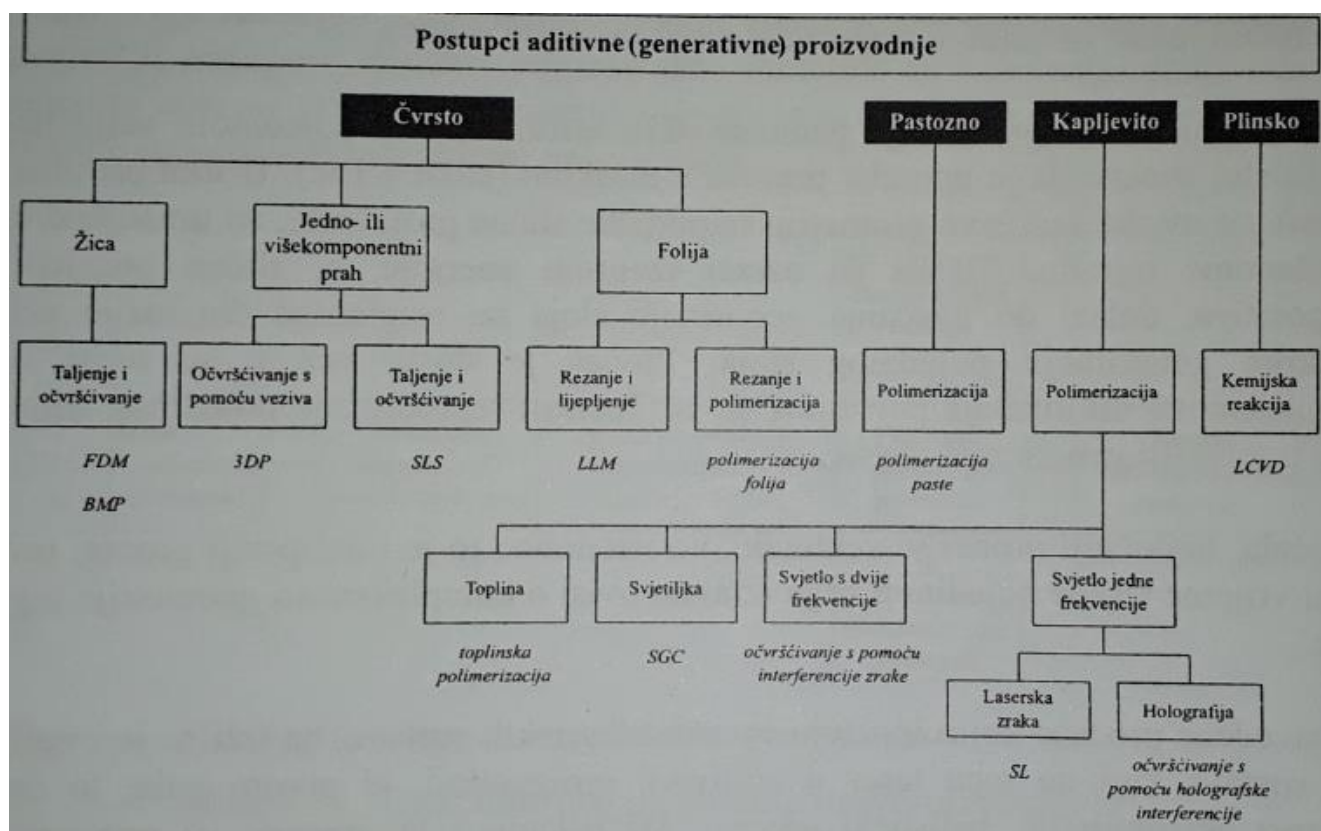
¹¹ Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 8.-9.

¹² Wohlers T.; Garnett T.; **History of additive manufacturing**; Wohlers Associates, INC.; 2014 str. 21. <http://wohlersassociates.com/history2014.pdf> (25. 08. 2017.)

¹³ Wohlers T.; Garnett T.; **History of additive manufacturing**; Wohlers Associates, INC.; 2014 str. 26. <http://wohlersassociates.com/history2014.pdf> (25. 08. 2017.)

3. SISTEMATIZACIJA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA

Aditivnu tehnologiju može se klasificirati tj. sistematizirati na temelju izvora korištene energije, primijenjene osnovne tehnologije poput laserske, tehnologije printa, tehnologije ekstrudiranja itd., putem sirovih materijala koji se koriste kao resursi, razlučivosti, veličine načinjenog proizvoda, na temelju fizike procesa, itd. Na slici 1 prikazana je klasifikacija tehnologije aditivne proizvodnje prema vrsti stanja početnog materijala.



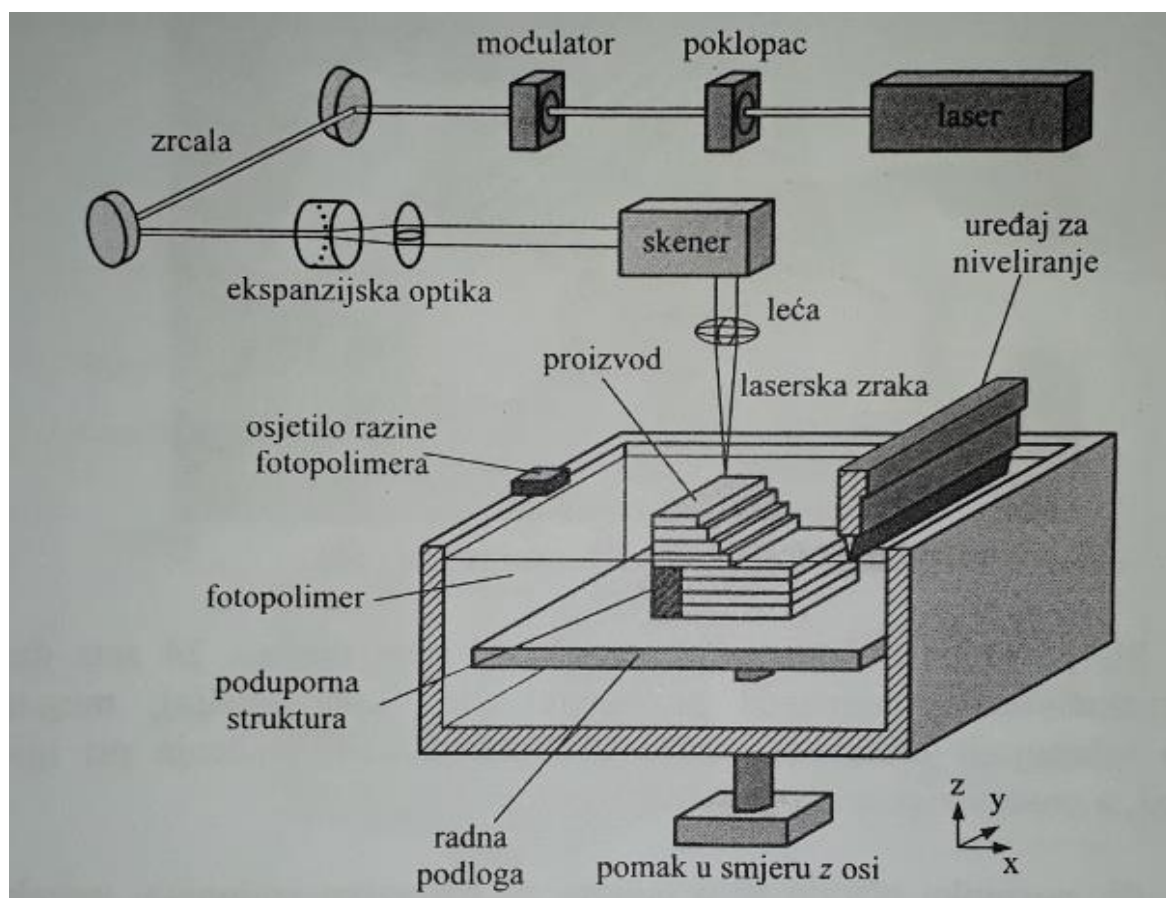
Slika 1: Sistematizacija tehnologije aditivne proizvodnje

Izvor: Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 54.

Prema autorima Godec i Šercer, sliku 1 moguće je prikazati kroz podjelu procesa polimerizacije, tj. očvršćivanja kapljevitih materijala, generiranje proizvoda pomoću čvrstog stapanja npr. uporabom djelomice ili potpuno rastaljenih čvrstih materijala poput prahova i/ili smijese prahova, generiranje proizvoda iz pastoznog stanja te putem precipitacije iz plinskog stanja.

3.1 Stereolitografija

Jedna od najčešće upotrebljivanih tehnologija aditivne proizvodnje jest stereolitografija. Proces se temelji na fotolitografskim metodama s UV polimerizacijom. „Proizvodi s pomoću postupaka stereolitografije nastaju polimeriziranjem niskoviskozne polimerne kapljevine sloj po sloj. Stereolitografijom se uglavnom prerađuju fotopolimeri temeljeni na akrilnim, vinilnim ili epoksidnim smolama.“¹⁴ Princip rada prikazan je na slici 2.



Slika 2: Princip SLA postupka

Izvor: Godec D, Šercer M; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str 61.

Elementarni dijelovi SLA uređaja su Ar ili He-Cd laser i njegova optička oprema, zrcalo koje je potrebno za usmjeravanje zraka, posuda s fotopolimerom i pokretna podloga s mogućnošću kretanja u smjeru okomite osi dužinom razmaka sloja CAD modela.

¹⁴ Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 60.

Princip rada temelji se na generiranju i usmjeravanju laserske UV zrake koja se potom preko pomičnih zrcala usmjerava na različite horizontalne ravnine fotopolimera. Molekule fotopolimera selektivno se očvršćuju prilikom zračenja, sukladno tome osim očvršćivanja fotopolimer se i srašćuje i time se prijanja na prethodni sloj. Početni sloj najčešće se nanosi na metalnu radnu podlogu. Pri završetku nanošenja sloja, radna podloga se spušta po vertikalnoj osi za debljinu idućeg sloja. Kako je proizvod građen u kapljevitom stanju, pri izradi određenih oblika, potrebno je koristiti podupor. Podupor je fizički proizvod koji je potrebno napraviti tijekom procesa pravljenja prototipnog proizvoda.¹⁵

Većina fotopolimera reagira na radijaciju UV frekventnog pojasa. Pri izlaganju takvim zrakama fotopolimerni materijali se podvrgavaju kemijskoj reakciji pri kojoj dolazi do stvrdnjavanja. Može se koristiti više vrsta radijacije zrakama, poput gama zraka, X-zraka, snop elektrona, UV, te u određenim sustavima vidljiva svjetlost. U SL sustavima, UV i vidljive zrake najčešće su u upotrebi. U mikroelektronskoj industriji koriste se UV zrake i snopovi elektrona dok u dentalnoj industriji pretežito dominiraju zrake iz vidljivog spektra.¹⁶

Prednosti i nedostaci SLA postupka prikazani su u tablici 1 prema autorima Godec, Šercer.

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> • mogućnost rada 24 h dnevno • visoka razlučivost • pravljenje višebojnih proizvoda • nema geometrijskih ograničenja • potpuna automatiziran proces 	<ul style="list-style-type: none"> • potreba za podupor i naknadno uklanjanje istog • potrebna naknadna obrada proizvoda • deformacija polimera pri očvršćivanju • razvijaju se otrovni plinovi • ograničenje materijala samo na fotopolimere • ograničena primjena proizvoda

Tablica 1: Prednosti i nedostaci SLA postupka

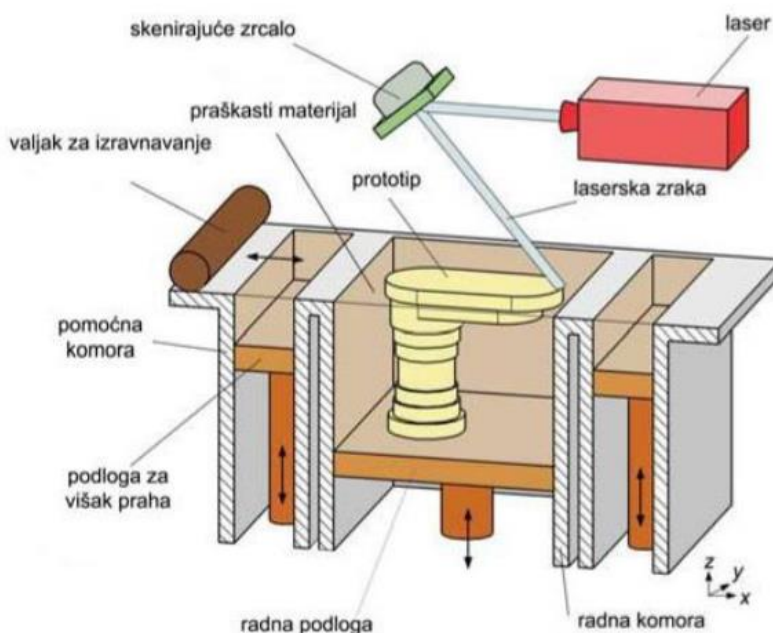
Izvor: Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 61.

¹⁵ Godec D, Šercer M; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015 str 61

¹⁶ Gibson I, Rosen D.W., Stucker B.; **Additive Manufacturing Technologies**; Springer Science; New York; 2010.

3.2 Selektivno lasersko srašćivanje

Selektivno lasersko srašćivanje (engl. „*Selective Laser Sintering*“ - SLS) patentiran je 1986. godine te je jedan od najvažnijih tehnologija aditivne proizvodnje. Takvim je postupkom moguće prerađivati gotovo sve materijale u praškastom obliku. Pri proizvodnji koriste se materijali poput keramike, voskova, metalnih prahova te polimernih materijala (PVC, elastomeri, PA, itd.). Kod izrade metalnih proizvoda koriste se metalni prahovi sa polimernim i metalnim vezivima te jednokomponentni prahovi za koje nije potrebno koristiti veziva. Pri korištenju materijala sa vezivima, vezivo se odstranjuje pri naknadnoj obradi čime se dobivaju porozni proizvodi, pa se gustoća povećava dodatnom naknadnom obradom.¹⁷



Slika 3: Princip rada SLS postupka

Izvor: Horvat, M; **Pregled aditivnih postupaka proizvodnje;** Završni rad br 188/PS/2016; str 15.

Radna komora ispunjena je inertnim plinom poput dušikovog plina kako bi se smanjio stupanj oksidacije i degradacije praškastog materijala. Prah je zagrijan i održavan na temperaturi koja je ispod granice taljenja i/ili staklastoj tranziciji temperature praškastog materijala. Infracrveni grijači smješteni su iznad radne komore kako bi održavali temperaturu u okruženju proizvoda te iznad samih pomoćnih komora gdje se nalazi višak praha. Takvo

¹⁷ Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja;** Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 86.

predgrijavanje praha i održavanje visoke temperature potrebno je kako bi se minimizirala potrošnja energije samog lasera u procesu izrade i kako bi se smanjile deformacije proizvoda. Kada je prašak formirao zadovoljavajući sloj te je predgrijan, fokusirana CO₂ laserska zraka usmjerena je u materijal te se pomiče uz pomoć galvanometra te na taj način srašćuje samo one čestice materijala na koje je usmjerena. Ostatak praška ostaje u početnom stanju i služi kao podupor za idući sloj. Samim time nepotrebno je koristiti ikakav drukčiji model podupora. Pri završetku sloja, radna platforma spušta se za visinu idućeg sloja, idući sloj praška potom je niveliran i spreman za ponavljanje procesa u daljnjem dijelu izrade proizvoda, te nastavlja do završetka izrade proizvoda. Potreban je period hlađenja kako bi se dozvolilo pravilno formiranje dijelova te adaptacija na temperaturu ambijenta i atmosfere. Ukoliko se ne dozvoli period hlađenja može doći do degradacije, oksidacije i deformacija uslijed neravnomjerne i nagle promjene temperatura.¹⁸

U sljedećoj tablici navedene su prednosti i nedostatci SLS postupaka.

Prednosti	Nedostatci
<ul style="list-style-type: none"> • primjena većeg broja materijala • relativno brz postupak • višak praha podupire proizvode • neiskorišteni materijal se može koristiti za druge proizvode 	<ul style="list-style-type: none"> • loša kvaliteta površine proizvoda • u procesu očvršćivanja površine mogućnost očvršćivanja neiskorištenog praha • pri uporabi određenih materijala potrebna je zaštitna atmosfera (otrovni plinovi kod npr. PVC-a)

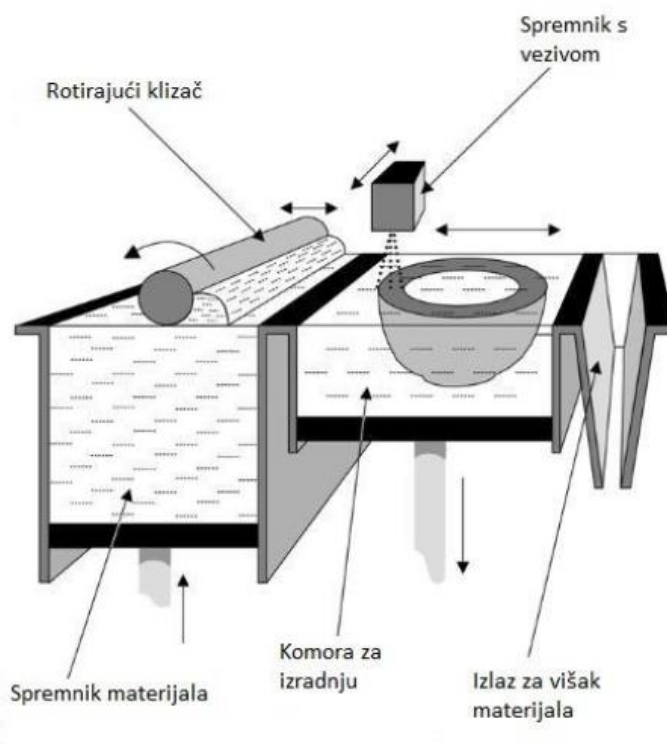
Tablica 2: Prednosti i nedostatci SLS postupka

Izvor: Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 88.

¹⁸ Gibson I., Rosen D.W., Stucker B.; **Additive Manufacturing Technologies**; Springer Science; New York; 2010. str. 104-105.

3.3 3D tiskanje

U skupinu brzih postupaka aditivne slojevite proizvodnje spada postupak 3D tiskanja, patentiranog sa strane MIT-a (*engl. „Massachusetts Institute of Technology“*) 1989. godine. Radi se o pouzdanom, jeftinom i vrlo brzom stroju koji omogućuje izradu 3D proizvoda pomoću računalnih modela, te je pristupačan za uredske uvjete pošto nema razvijanja štetnih tvari tijekom procesa proizvodnje.¹⁹



Slika 4: Proces 3D tiskanja – shematski prikaz

Izvor: Horvat, M; **Pregled aditivnih postupaka proizvodnje;** Završni rad br 188/PS/2016; str 18

Prema slici 4 vidljiv je shematski prikaz procesa 3D tiskanja. Temelj postupka je povezivanje čestica praha sa vezivom. Spremnik s vezivom pomiče se u smjeru osi x i y, dok se komora za izgradnju pomiče u smjeru z osi. U prvom dijelu procesa valjak nanosi materijal iz spremnika na podlogu za izradu proizvoda, a potom višak materijala pada u odgovarajući spremnik (izlaz za višak materijala ili u obliku spremnika za višak materijala). U povratnom procesu gibanja valjka, sa mlaznicama koje su smještene na valjku se u količini kapi nanosi vezivo na već nanese prah, što rezultira povezivanjem čestica praha. Pri završetku jednog

¹⁹ Godec D, Šercer M; **Aditivna proizvodnja;** Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015 str 86.

sloja budućeg proizvoda, podloga se spušta te se proces ponavlja do završetka izrade proizvoda.²⁰

U sljedećoj tablici prikazani su prednosti i nedostaci postupka 3D tiskanja.

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> • naspram drugih postupaka kraće vrijeme izrade • relativno jeftiniji sirovi materijali • ponovno korištenje suvišnog materijala • uklonjena potreba za poduporom 	<ul style="list-style-type: none"> • loša kvaliteta površine proizvoda • pri završetku potrebno je čekati da se materijal stvrdne • ograničen broj primjenjivih materijala

Tablica 3: Prednosti i nedostaci 3DP postupka

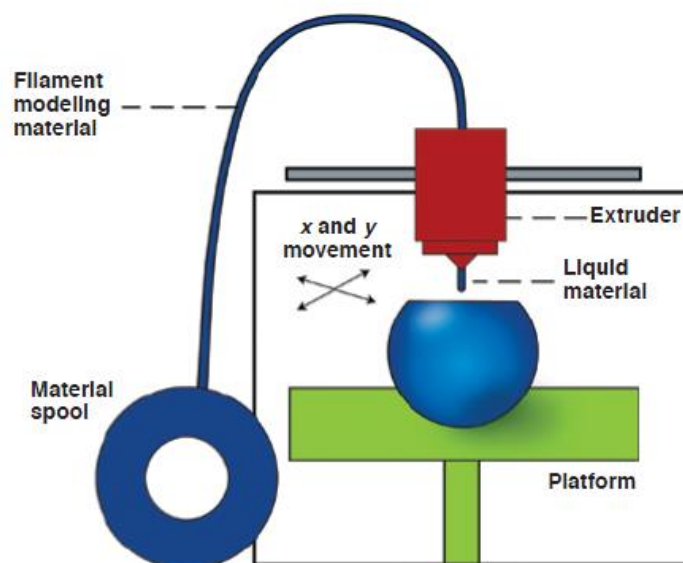
Izvor: Izrada autora, podatci: Horvat, M.; **Pregled aditivnih postupaka proizvodnje;** Završni rad br. 188/PS/2016; str. 19.

3.4 Taložno očvršćivanje

Taložno očvršćivanje (engl. „*Fused Deposition Modeling*“ – *FDM*) pod razvojem tvrtke Stratasys se bazira na postupku izrade proizvoda sloj po sloj, koristeći najčešće rastaljeni polimerni materijal. FDM uređaji funkcioniraju na načelima tro-osnog NC obradnog centra. Prilikom izrade kompleksnije geometrije potrebno je koristiti podupor. U takvom slučaju rješenje je definirano korištenjem više mlaznica, a u slučaju da se koriste samo dvije mlaznice jedna se koristi kako bi nanosila materijal za izradu proizvoda dok se druga koristi za izradu podupora. Sama kvaliteta površine proizvoda uspoređuje se s SLS postupcima, ali proizvodi su više porozniji. Mogućnost povišenja gustoće proizvoda omogućena je naknadnim postupkom prodiranja punila u sam proizvod.²¹

²⁰ Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja;** Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 96.

²¹ Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja;** Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 102.-103.



Slika 5: FDM postupak

Izvor: SOLIDFILL 3D Printing Solutions; Fused Deposition Modeling; <http://solidfill.com/wp-content/uploads/2014/11/FDM1.png> (26.08.2017.)

Prijevod sa slike 5: Materijal za modeliranje („*Filament modeling material*“), kolut sa namotanim materijalom („*Material spool*“), x i y pokreti („*x and y movement*“), ekstruder („*Extruder*“), tekući materijal („*Liquid material*“), platforma („*Platform*“).

Polimerni materijal u obliku žice prolazi kroz ekstruzijsku mlaznicu kroz koju se kontrolira protok materijala. Mlaznica se grije kako bi dosegla temperaturu tališta materijala, te ima slobodu kretanja u horizontalnim i vertikalnim smjerovima. Putanja mlaznice je kontrolirana od strane programskog sustava za upravljanje. Printer putanju određuje u odnosu na prethodno učitani 3D model koji se želi izraditi. Dio se izrađuje postepenim ekstrudiranjem termoplastičnog materijala sloj po sloj. Prilikom doticaja sa podlogom ili prethodno izrađenim slojem, pri pomicanju mlaznice materijal se gotovo trenutačno skrućuje.²²

U sljedećoj tablici prikazane su prednosti i nedostaci postupka 3D ispisa FDM postupkom.

²² Alabdullah, F.; **Fused Deposition Modeling (FDM) Mechanism**; International Journal of Scientific & Engineering Research; Vol. 7; Broj 5.; Svibanj 2016.

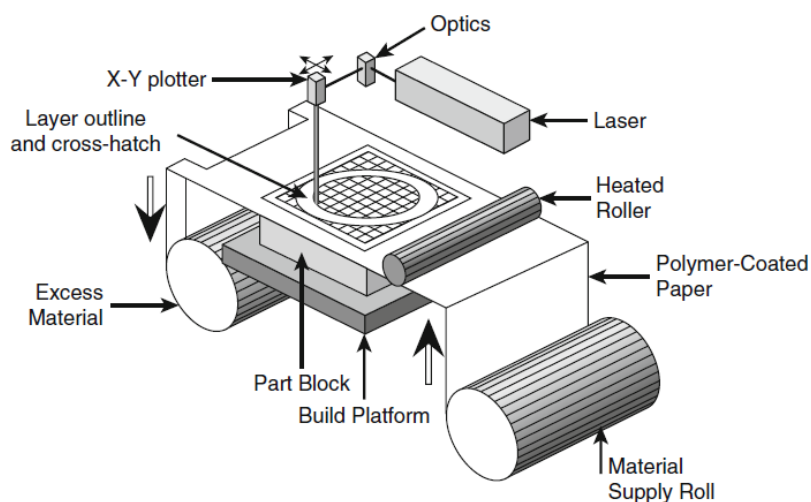
Prednosti	Nedostatci
<ul style="list-style-type: none"> • manja potrošnja energije • ne zahtjeva hlađenje i ventilaciju • jednostavna uporaba • relativno mala investicija/niski troškovi održavanja • male izmjere uređaja 	<ul style="list-style-type: none"> • ograničen izbor materijala • nužnost izrade podupora • vidljive linije između slojeva • mala čvrstoća proizvoda • oscilacije temperature može dovesti do delaminiranja proizvoda • potrebna naknadna obrada proizvoda

Tablica 4: Prednosti i nedostatci FDM postupaka

Izvor: Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 103.

3.5 Izrada objekata laminiranjem

Često u praksi nazivom „izrada objekata laminiranjem“ (engl. „*Laminated Object Manufacturing*“ - LOM) zamjenjujemo postupak slojevite izrade proizvoda laminiranjem (engl. „*Layer Laminate Manufacturing*“ – LLM). LLM postupak temelji se na korištenju CO₂ lasera, te se uz pomoć njega reže laminiran materijal, koji je prethodno postavljen, po unaprijed računalno definiranom obliku poprečnog presjeka željenog proizvoda.²³



Slika 6: Postupak LOM-a

Izvor: Gibson I., Rosen D.W., Stucker B.; **Additive Manufacturing Technologies**; Springer Science; New York; 2010. str. 208.

²³ Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 112.

Prijevod slike 6: Optika („*Optics*“), X-Y ploter („*X-Y plotter*“), laser („*Laser*“), zagrijani valjak („*Heated Roller*“), nacrt sloja i poprečni otvor („*Layer outline and cross-hatch*“), polimerom presvučeni papir („*Polymer-Coated Paper*“), višak materijala („*Excess Material*“), blok izratka („*Part Block*“), radna platforma („*Build Platform*“), rola dobavnog materijala („*Material Supply Roll*“).

U procesu izrade proizvoda putem LOM tehnologije (slika 6) zagrijani valjak prelazi preko radne površine (ili prethodnog sloja) kako bi se materijal mogao zalijepiti za isti. Zatim se pomoću laserske zrake izrezuje kontura presjeka dijela proizvoda kojeg se izrađuje, tj. izrezuje se dio materijala koji se ne koristi kao budući proizvod, a zatim zagrijani valjak ponovno prelazi kako bi nanio novi sloj materijala. Radna podloga se potom spušta za debljinu idućeg sloja, te se cijeli proces ponavlja dok proizvod nije gotov. Na kraju procesa, višak materijala se odstranjuje s platforme kako bi se olakšalo odvajanje gotovog proizvoda sa radne podloge.²⁴ U tablici 5 navedene su prednosti i nedostatci LOM postupka.

Prednosti	Nedostatci
<ul style="list-style-type: none"> • relativno velika brzina izrade • mogućnost izrade velikih proizvoda • nije potreban podupor • nepostojanje zaostalih naprezanja • niska cijena materijala za izradu 	<ul style="list-style-type: none"> • mali izbor materijala • potreban poseban rashladni uređaj • potreba za podtlačnim sustavom za odstranjivanje viška papira i folija • anizotropna svojstva • stabilnost proizvoda ograničena čvrstoćom lijepljenih slojeva • šuplji proizvod izrađuje se kao dvodijelni • naknadna obrada + mogućnost raslojavanja • velik udio viška materijala

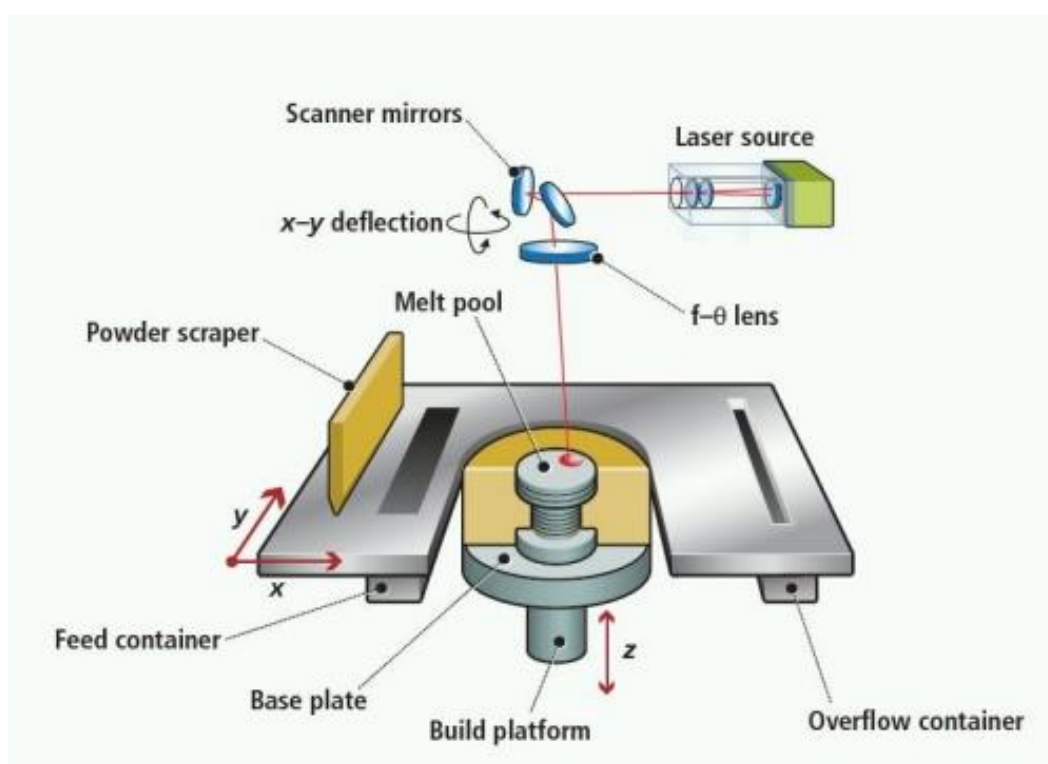
Tablica 5: Prednosti i nedostatci LOM postupaka

Izvor: Izrada autora; podatci: Godec, Šercer „Aditivna proizvodnja“ str. 114.

²⁴ Horvat, M; **Pregled aditivnih postupaka proizvodnje**; Završni rad br. 188/PS/2016; str. 25.

3.6 Selektivno lasersko taljenje

Selektivno lasersko taljenje (engl. „*Selective Laser Melting*“ – *SLM*) koristi se pri izrađivanju proizvoda visoke gustoće. Djeluje na sličnom principu poput SLS tehnologije, no za razliku od navedenog, SLM ne srašćuje prahove nego ih dovodi do razine potpunog tališta što omogućuje izradu gustih, krutih metalnih dijelova bez korištenja vezivnog materijala i naknadne obrade poput pečenja koje je u praksi kod primjene SLS postupaka.²⁵ Postupak SLM tehnologije prikazan na slici 7 objašnjen je u daljnjem tekstu.



Slika 7: Prikaz SLM tehnologije

Izvor: Vision-Systems; <https://tinyurl.com/ya4f6jst> (01.09.2017.)

Prijevod sa slike 7: Zrcala za skener („*Scanner mirrors*“), izvor lasera („*Laser source*“), x-y pomicanje („*x-y deflection*“), sakupljač praha („*Powder scraper*“), mjesto topljenja („*Melt pool*“), f-θ leća („*f-θ lens*“), spremnik („*Feed container*“), radna podloga („*Build platform*“), bazna ploča („*Base plate*“), spremnik za višak („*Overflow container*“).

Praškasti materijal nalazi se u spremniku („*Feed container*“ na slici 7), iako postoje i varijacije sa raspršivačem, koloni s lijevkom ili mehanizmu za nanošenje materijala. U takvim

²⁵ Vadas, I.; **Aditivne tehnologije u medicini**; završni rad; oznaka i redni broj rada 30/2016; SFSB; 2016; str. 9.

izvedbama kod npr. nanošenjem pomoću lijevka, praškasti se materijal nanosi direktno iznad radne podloge. Spremnik sa prahom podiže visinu kako bi se propisana količina praha mogla uz pomoć mehanizma za niveliranje pravilno rasporediti po radnoj podlozi. Mehanizam za niveliranje može biti u obliku tvrdog strugala, mekanog kotla ili valjka. Selektivni dijelovi praškastog sloja koji odgovaraju mjerama proizvoda, pomoću fokusirane laserske zrake dostižu temperaturu tališta te se povezuju sa prethodno skučenim slojem. Laseri koji se koriste u takvim postupcima najčešće su optički laseri kako bi se smanjila potrošnja energije i pojednostavilo održavanje. Proces se ponavlja dok proizvod nije gotov, te se nakon svakog odrađenog sloja radna podloga spušta se za visinu idućeg sloja. Kod postupka gdje se obrađuje metal, postupak se provodi u atmosferi dušika ili argona (u komori radne podloge) kako bi se snizio sadržaj kisika što rezultira manjom stopom oksidacije metala tijekom fuzijskog procesa.²⁶

U tablici 6 navedene su prednosti i nedostaci SLM postupka.

Prednosti	Nedostatci
<ul style="list-style-type: none"> • široki raspon upotrebe metalnih materijala • visoka točnost • izdržljivi, jaki metalni dijelovi 	<ul style="list-style-type: none"> • gruba površina proizvoda/ naknadna obrada • manja točnost izmjera naspram SLS postupka • potrebna opskrba inertnim plinom • visoki troškovi

Tablica 6: Prednosti i nedostaci SLM postupaka

Izvor: Izrada autora; podatci: Gibson I., Rosen D.W., Stucker B.; **Additive Manufacturing Technologies**; str. 123.-126.

²⁶ Gibson I., Rosen D.W., Stucker B.; **Additive Manufacturing Technologies**; Springer Science; New York; 2010. str. 123.-126.

3.7 Taljenje s pomoću snopa elektrona

Taljenje s pomoću snopa elektrona (engl. „*Electron Beam Melting*“ – EBM) je postupak kojim se proizvod gradi sloj po sloj na način da se tali sloj metalnog praha uz pomoć snopa elektrona. Iako nije potrebno proizvod naknadno obraditi, gotov proizvod treba sadržavati „dodatke“ kako bi se naknadno obradio u dimenzije konačnih izmjera.²⁷

Za razliku od sustava baziranih na laserima, EBM koristi visoko-energetske elektronske snopove kako bi inducirao fuziju između čestica metalnog praha. Takav proces razvijen je od strane Chalmers University of Tehcnology u Švedskoj, te je komercijaliziran od strane Arcam AB 2001. godine. EBM ima sličnosti sa SLM postupkom, a razlog tome jest fokusirana elektronska zraka koja djeluje na tanki sloj nanešenog praškastog materijala, uzrokujući time lokalno taljenje i ponovno skrućivanje u poprečnom presjeku proizvoda u izradi.²⁸ U tablici 7 prikazane su razlike između EBM i SLM postupaka, a na slici 8 je prikazan EBM postupak izrade.

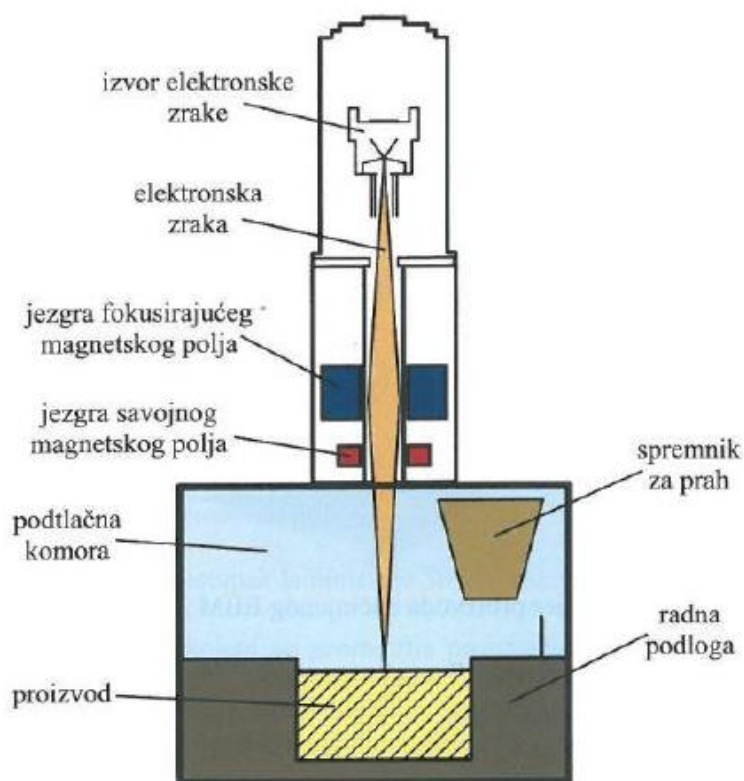
Karakteristike	EBM	SLM
Termalni izvor	Elektronski snop	Laser
Atmosfera	Vakuum	Inertni plin
Skeniranje	Zavojnice	Galvanometri
Apsorpcija energije	Ograničena vodljivost	Ograničena apsorpcija
Predgrijavanje praha	Pomoću elektronskog snopa	Infracrveni grijači
Brzina skeniranja	Magnetski pogon, vrlo brzo	Ograničeno galvanometrima
Potrošnja energije	Prosječna	Visoka
Površinska obrada	Prosječna/slaba	Izvrсна/prosječna
Rezolucija	Prosječna	Izvrсна
Materijali	Metali (vodljivi)	Polimeri, metali i keramika

Tablica 7: Razlike između EBM i SLM postupaka

Izvor: Gibson I., Rosen D.W., Stucker B.; **Additive Manufacturing Technologies**; Springer Science; New York; 2010. str. 127.

²⁷ Godec D., Šercer M.; **Additivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 154.

²⁸ Gibson I., Rosen D.W., Stucker B.; **Additive Manufacturing Technologies**; Springer Science; New York; 2010. str. 126.



Slika 8: Prikaz EBM postupka

Izvor: Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 155.

Pri izradi proizvoda EBM postupkom proces se odvija u podtlačnoj komori. Pomoću posebne mlaznice koja je učvršćena na komoru proizvodi se snop elektrona kojemu je omogućeno savijanje tako da mu je raspoloživ svaki kutak komore kako bi kvalitetno pokrio područje radne podloge. Kroz cijev koja je pod povišenom temperaturom od cca 2500 °C, emitiraju se elektroni koji se potom ubrzavaju u električnom polju na polovinu svjetlosne brzine, dok se upravljanje snopom vrši pomoću dva magnetska polja, gdje prvo služi kao magnetska leća za fokus snopa i za dobivanje željenog promjera istog, a drugo služi za usmjeravanje snopa na željeno mjesto. Tim putem elektroni se sudaraju s metalnim prahom gdje se kinetička energija sudara pretvara u toplinsku što rezultira lokalnim taljenjem metalnog praha.²⁹ U tablici 8 prikazane su prednosti i nedostaci EBM postupka.

²⁹ Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 154.-155.

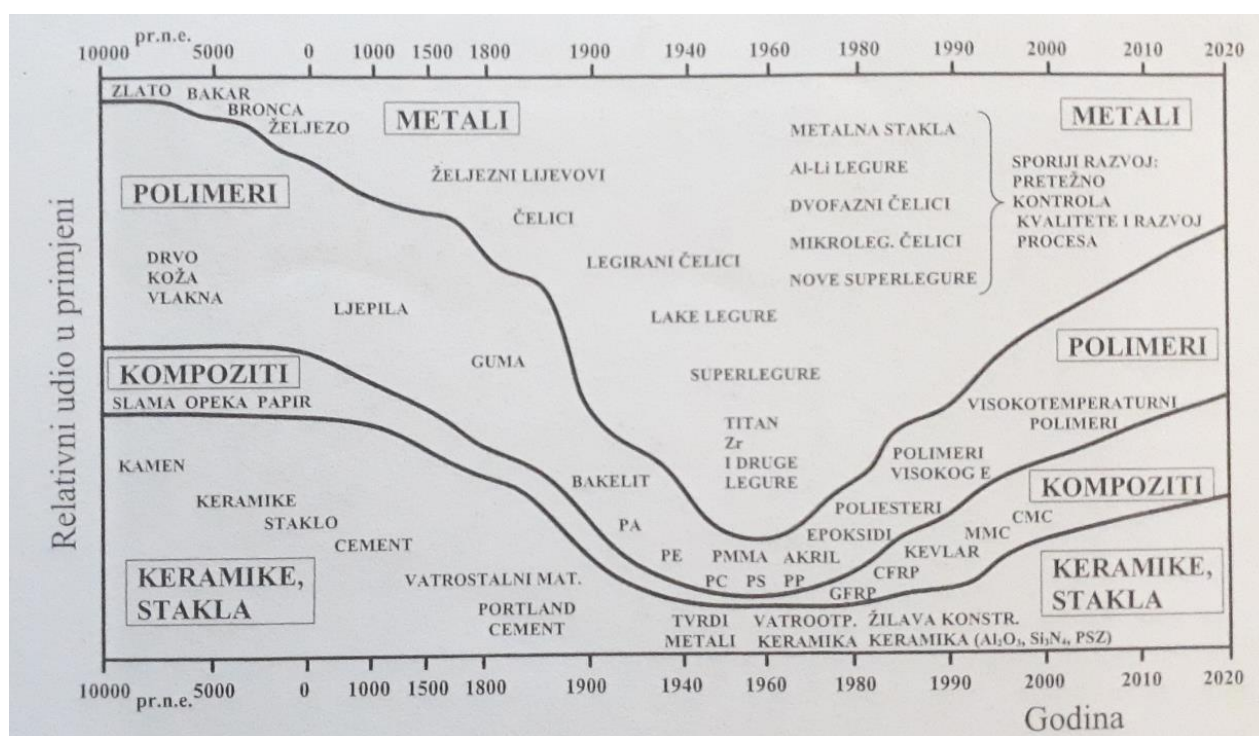
Prednosti	Nedostatci
<ul style="list-style-type: none"> • u malom snopu visoka razina energije • izostajanje oksida i nitrida na površini proizvoda / izrada proizvoda u podtlaku • vrlo dobra mehanička svojstva • omogućuje homogeno navarivanje i/ili kombinaciju različitih materijala • niski troškovi instaliranja i održavanja • visoka brzina izrade 	<ul style="list-style-type: none"> • visoka podtlačna atmosfera + zahtjev prisustva dodanog uređaja • prisutno gama zračenje • korištenje samo materijala koji su vodiči električne energije

Tablica 8: Prednosti i nedostatci EBM postupaka

Izvor: Godec D., Šercer M.; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015. str. 155.

4. SISTEMATIZACIJA KORIŠTENIH MATERIJALA U ADITIVNOJ PROIZVODNJI

Područje aditivne proizvodnje za realizaciju izrade proizvoda i prototipa u svojim postupcima koristi široki spektar materijala poput metala, polimera, kompozita, keramike, stakla, ali i biomaterijala. Izbor materijala ovisi o samoj primjeni proizvoda, dostupnosti materijala, te odabranim postupkom aditivne tehnologije.



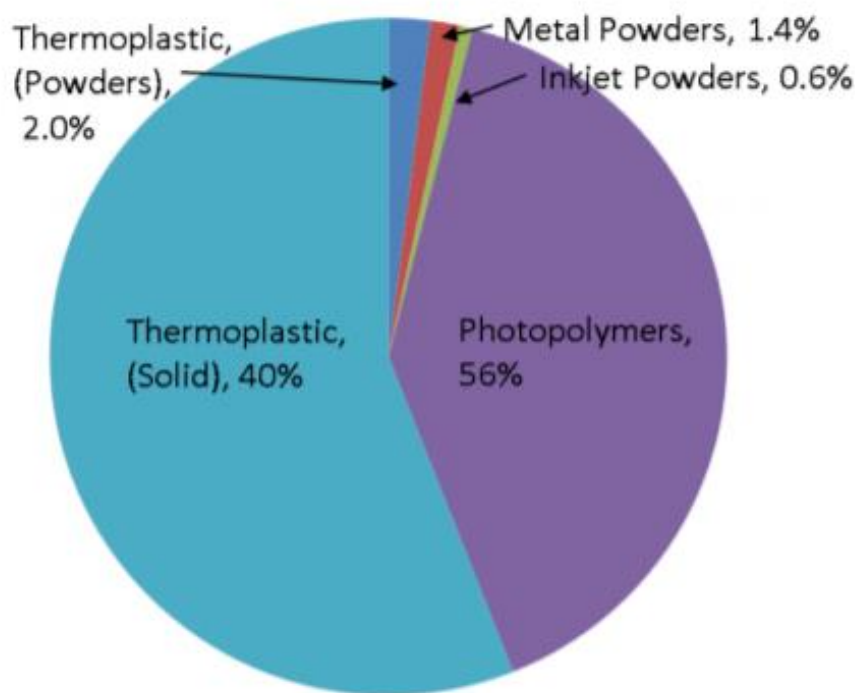
Slika 9: Primjena i razvoj polimernih materijala

Izvor: Šercer M., Križan B., Basan R.; **Konstruiranje polimernih proizvoda**; Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnja; Zagreb, 2008.

Na slici 9 prikazan je pregled udjela polimernih materijala u usporedbi sa materijalima poput metala, kompozita, keramike i stakla. Za razliku od metala, polimeri imaju prednost sa svojim svojstvima poput niske gustoće, postojanosti u uvjetima pogodnim za nastanak korozije, jednostavne proizvodnje i niske cijene. Polimerni materijali pri potrošačkoj upotrebi najrasprostranjeniji su, te se najviše koriste. Specijalizirane tvrtke, institucije, itd. koriste širok spektar materijala, poput upotrebe vode u medicini za izradu prototipa organa gdje se voda

kao medij za izradu koristi u posebnim komorama kako bi temperatura ambijenta osigurala kvalitetnu postojanost materijala.³⁰

Slika 10 prikazuje postotak korištenja materijala na temelju „open source“ istraživanja u potrošačkom dijelu.



Slika 10: Korištenje materijala u primjeni aditivne tehnologije

Izvor: Forster, A; **Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability**; National Institute of Standards and Technology; Gaithersburg; 2015.

Prijevod sa slike 10: Termoplastika-prah („*Thermoplastic – Powders*“), termoplastika-čvrsto („*Thermoplastic – Solid*“), fotopolimeri („*Photopolymers*“), metalni prah („*Metal Powders*“), Inkjet prah („*Inkjet Powders*“).

U daljnjem dijelu teksta dan je pregled svake od navedenih skupina materijala s većim osvrtom na polimerne materijale.

³⁰ Forster, A.; **Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability**; National Institute of Standards and Technology; Gaithersburg; 2015.; str. 6.

4.1 Metali

Svojstva metala su visoka krutost, žilavost, otpornost na trošenje, toplinska i električna vodljivost, itd. U aditivnoj proizvodnji karakteristična je primjena metalnih materijala u automobilske, robotske, biomedicinske i zračne industrije. Najčešće su primjene u izmjeni dijelova u zračnoj industriji, dok ostale industrije počinju koristiti metale u svrhu proizvodnje gotovih proizvoda. Glavni faktori ograničenja pojavljuju se u obliku visokih cijena materijala i strojeva, ograničenih veličina oblika i sporij stopi taloženja. Najčešće korišteni materijali u aditivnoj proizvodnji su čelik, titanij, zlato, srebro, kobalt, krom, aluminij te njihove legure.

³¹

4.2 Keramika

Keramika osigurava tvrdoću i otpornost na habanje. Otporna je na vodu i toplinu, te se za izradu mogu koristiti razne boje. Glavna prednost keramike kao materijala pri korištenju u aditivnoj proizvodnji jest kompatibilnost sa ostalom skupinom materijala. Posebice pri uporabi u medicinske industrije, zbog minimalnog reagiranja s tkivom domaćina. Također zahvaljujući biokompatibilnosti keramika se značajno koristi pri izradi implantata u kostima, zglobovima i zubima.

4.3 Biomaterijali

Biomaterijali su vrsta materijala koji pri međusobnom djelovanju s biološkim entitetima predstavljaju odgovarajuću zamjenu za prirodno tkivo i pružaju adekvatan suživot s biološkim sustavima u interakciji. U odnosu na „klasične“ materijale imaju karakteristiku biokompatibilnosti. Biokompatibilnost se smatra važnom stavkom zbog implantata i uređaja koji djeluju u tkivu s obzirom na činjenicu da korozija implantata može dovesti do smanjenja nosivosti i/ili razgradnju na toksične spojeve unutar tkiva. Primjena biomaterijala u medicini koristi se za regeneraciju tkiva, izradu proteza te medicinskih uređaja i uređaja za primjenu lijekova. Biomaterijali se mogu svrstati pod metale, keramiku, polimere i kompozite.³²

³¹ Sames, W; **The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing**; ISSN 1743-2804; <http://tinyurl.com/yde4s4gw> (01.09. 2017.)

³² Vadas, I.; **Aditivne tehnologije u medicini**; završni rad; oznaka i redni broj rada 30/2016; SFSB; 2016; str 13.

4.4 Polimeri

Prvi poznati polimerni materijali čovjeku su bili organski polimerni materijali poput kože, drva i biljnih vlakna. Kako je tehnologija napredovala nova skupina polimernih materijala poput plastike i guma dobivaju popriličnu važnost u širokoj tehničkoj primjeni. Svojstva poput niske gustoće, visoke čvrstoće, postojanosti u uvjetima korozije, lake proizvodnje i jeftinije cijene rezultira time da polimerni materijali sve više zamjenjuju materijale poput metala.³³

4.4.1 Plastomeri

S udjelom oko 90% u sveukupnoj proizvodnji kao najzastupljenija skupina polimera su plastomeri. U odnosu na polimere drugih skupina posjeduju relativno veliku čvrstoću i mogućnost lakog oblikovanja što je pogodno za izradu vrlo kompliciranih proizvoda.³⁴

Plastomeri amforne strukture pružaju zadovoljavajuću čvrstoću i ovisno o sastavu mogu biti podatljivi i meki ili kruti i krhki. Krutost i krhkost raste s izloženosti pada vrijednosti temperature.³⁵

4.4.2 Duromeri

Duromeri predstavljaju polimerni materijal s gusto prostorno umreženom strukturom, koja je produkt polimerizacije. Proces polimerizacije iniciran je miješanjem aktivnog sastojka te zagrijavanjem na povišenu temperaturu pri kojoj slijedi reakcija djelovanjem ultraljubičastog zračenja. Kao posljedica stvaraju se gusto umrežene strukture koje imaju relativno visoku čvrstoću, modul elastičnosti i modul smicanja, te postojanost dimenzija i oblika pri povišenom temperaturama.³⁶

³³ Šercer M., Križan B., Basan R.; **Konstruiranje polimernih proizvoda**; Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnja; Zagreb, 2008. str. 1.-2.

³⁴ Šercer M., Križan B., Basan R.; **Konstruiranje polimernih proizvoda**; Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnja; Zagreb, 2008. str.12.

³⁵ Šercer M., Križan B., Basan R.; **Konstruiranje polimernih proizvoda**; Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnja; Zagreb, 2008. str.13.

³⁶ Šercer M., Križan B., Basan R.; **Konstruiranje polimernih proizvoda**; Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnja; Zagreb, 2008. str. 16.

4.4.3 Elastomeri

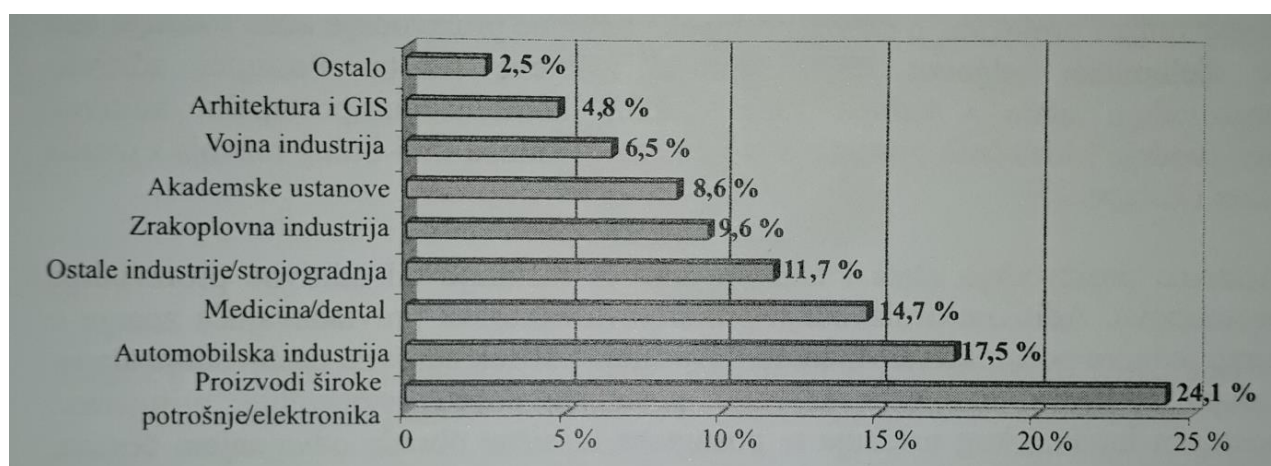
Elastomeri su polimerni materijali koji u najvećim dijelu imaju karakteristiku male tvrdoće i velike elastičnosti. Pri nižim temperaturama sposobnosti vraćanja u prvobitni oblik nešto je manje izražena. Elastomeri se koriste za izradu dijelova koji služe za prigušenje vibracija i buke, zatim za izradu cijevi, brtvi, raznih vrsta izolacija te ostalih zaštitnih obloga.

³⁷

³⁷ Šercer M., Križan B., Basan R.; **Konstruiranje polimernih proizvoda**; Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnja; Zagreb, 2008. str. 17-18.

5. PODRUČJA PRIMJENE ADITIVNE PROIZVODNJE

Područja primjene aditivne tehnologije nalazimo u gotovo svim granama, od akademskih ustanova, potrošačke elektronike, vojne industrija, medicinske industrije, itd., pa sve do grana poput umjetnosti. Svrha proizvodnje može biti vizualizacija (prezentacija), izrada prototipa, izrada gotovih proizvoda, dijelova, alata, i izradi kalupa. Slika 11 prikazuje udio aditivne proizvodnje u pojedinim granama.



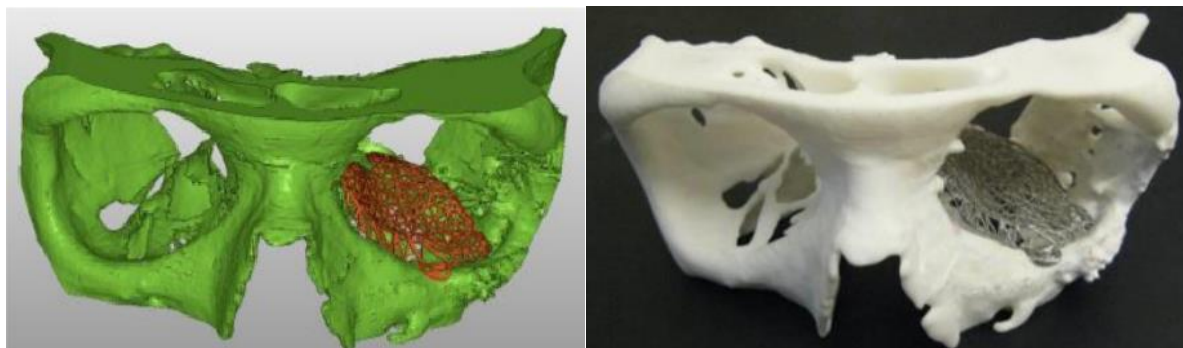
Slika 11: Područja primjene aditivne proizvodnje

Izvor: Godec D, Šercer M; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015 str 35.

U nastavku je prikazano nekoliko primjera primjene aditivne proizvodnje.

5.1 Primjena u medicini

Primjena u medicinskoj industriji ima povećani broj, od izrade proteza, implantata i organa što daje rezultat u obliku dizanja kvalitete života na višu razinu. Slika 12 prikazuje model u CAD programu i u izrađenom fizičkom obliku dok slika 13 prikazuje rezultat implementacije u pacijenta.



Slika 12: CAD model i izrađena kost

Izvor: Salmi, M; **Patient-specific reconstruction with 3D modeling and DMLS additive manufacturing;** Emerald Group Publishing; <https://tinyurl.com/y7jogd9n> (10. 09. 2017)



Slika 13: Implementirano rješenje na pacijentu

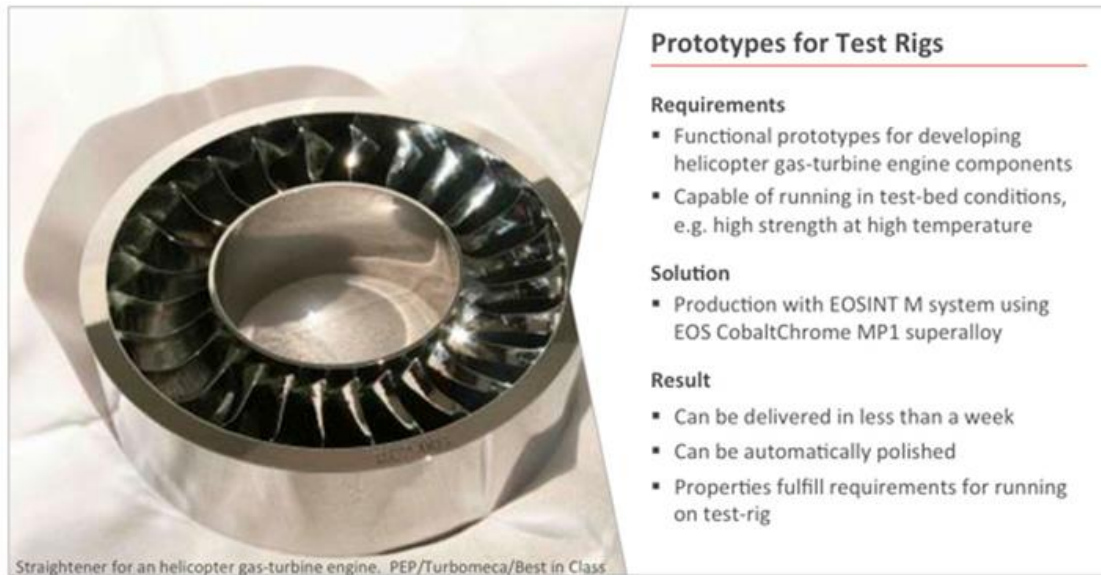
Izvor: Salmi, M; **Patient-specific reconstruction with 3D modeling and DMLS additive manufacturing;** Emerald Group Publishing; <https://tinyurl.com/y7jogd9n> (10.09. 2017)

Izrada samog vizualnog prototipa rađena je u CAD programu, dok je fizička izrada realizirana primjenom SLS postupka korištenjem materijala polyamid 2200. Također prototip prikazan na slici 12 rađen je od čelika. Prednost takvog načina primjene tehnologije naspram klasične rekonstrukcije lica jest ta da je implantant proizveden po mjeri pacijenta te su korišteni materijali koji su pogodni njegovom organizmu kako bi se spriječilo moguće odbacivanje.³⁸

³⁸ Salmi, M; **Patient-specific reconstruction with 3D modeling and DMLS additive manufacturing;** Emerald Group Publishing; str 4-5; <https://tinyurl.com/y7jogd9n> (10. 09. 2017)

5.2 Primjena u zrakoplovnoj industriji

Primjena aditivne proizvodnje u zrakoplovnoj industriji omogućuje proizvodnju kompleksnih proizvoda u kraćem vremenu, neovisnost o dobavljačima zbog izrade zamjenskih dijelova poput funkcijskih dijelova motora, rashladnog sistema, nosača itd.



Slika 14: Turbina izrađena primjenom aditivne proizvodnje

Izvor: EOS-manufacturing; <http://tinyurl.com/y7hqw5j5> (10.09.2017.)

Na slici 14 je prikazana turbina za helikopter, izrađen sa strane EOS-manufacturing. Proizvod je funkcionalan prototip, te proizvodnji nije potrebna završna obrada prilikom preuzimanja proizvoda. Za razliku od klasične izrade, proizvod je izrađen u kraćem vremenu, proizvedeno je manje otpadnog materijala.³⁹

³⁹ EOS-manufacturing; https://www.eos.info/industries_markets/aerospace/engines (10. 09. 2017.)

5.3 Primjena aditivne proizvodnje u automobilskoj industriji

Primjena aditivne proizvodnje u automobilskoj industriji pruža mogućnost brže i jeftinije izrade gotovih i rezervnih dijelova za automobile, od klipova cilindra, kotača, turbina, nosača za motor, itd.

Na slici 15 vidljivi su dijelovi Rolls-Royce automobila.



Slika 15: Izrađeni dijelovi automobila

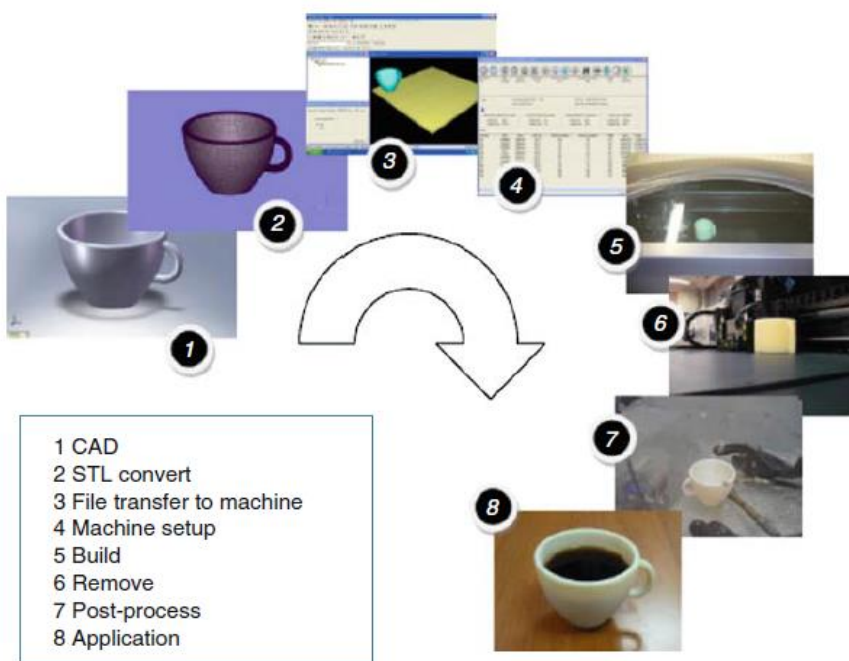
Tvrtka BMW izradila je model Rolls-Royce automobila nazvanog Phantom, automobil je poznat po tome što je više od deset tisuća dijelova izrađeno putem primjene aditivne proizvodnje.⁴⁰

⁴⁰ 3Dprint.com; The Rolls-Royce Phantom Now Has More Than 10,000 3D Printed Parts, BMW Looks to Expand Use Across Entire Line of Cars; <https://3dprint.com/142364/3d-printed-parts-bmw/> (20. 09. 2017.)

6. POSTUPAK IZRADE DIJELOVA PRIMJENOM ADITIVNE PROIZVODNJE

Postupak izrade određenog dijela primjenom aditivne proizvodnje se može podijeliti u više faza. Za manje dijelove koji služe u svrhu prezentacije (vizualizacije) nije potrebno raditi naknadnu obradu te se isti izrađuju kroz nekoliko karakterističnih faza aditivne proizvodnje. Za veće i kompleksnije dijelove te funkcionalne prototipove potrebne su dodatne faze izrade. To mogu biti faze poput čišćenja, bojanja, brušenja, sačmarenja, dodatne toplinske obrade, i druge.

Na slici 15 je prikazan proces izrade i korištenja dijela kroz osam karakterističnih faza. U nastavku je dan opis pojedinih faza.



Slika 16: Proces izrade dijela primjenom aditivne proizvodnje

Izvor: Gibson I, Rosen D.W., Stucker B.; **Additive Manufacturing Technologies**; Springer Science; New York; 2010. str. 4.

Prijevod sa slike: 1. CAD, 2. STL konverzija, 3. Prebacivanje datoteke na stroj, 4. Postavke stroja, 5. Izrada, 6. Vađenje (proizvoda/prototipa), 7. Naknadna obrada, 8. Primjena.

Prva faza izrade je kreiranje 3D modela primjenom određenog CAD programskog sustava. Isti se prvenstveno koristi za izradu 3D modela, izradu tehničke dokumentacije, te vizualizaciju i prezentaciju budućeg proizvoda. U reverzibilnom inženjerstvu postupak kreiranja 3D modela se obavlja putem skeniranja fizičkog modela. Na temelju skeniranja kreira se 3D model dijela unutar određenog programskog sustava te se zatim kreirani model može naknadno modificirati.

Druga faza izrade je kreiranje STL (engl. „*Stereolithography*“) datoteke na temelju prethodno kreiranog 3D modela. Većina komercijalnih CAD programskih sustava ima mogućnost spremanja 3D modela u STL formatu. STL datoteka sadrži informacije o vanjskim površinama tijela te je pogodna za daljnju obradu od strane programskog sustava kojim se definira sam proces izrade. Ovisno o vrsti programskog sustava koji se koristi, za obradu 3D modela se umjesto STL datoteke može koristiti i AMF datoteka (engl. „*Additive Manufacturing File*“). Prednost AMF datoteke jest mogućnost prikazivanja podataka o boji, teksturi površine i vrsti materijala. AMF je noviji format u odnosu na STL format.⁴¹

Treća faza izrade je učitavanje STL ili AMF datoteke u programski sustav za pripremu procesa ispisa 3D dijela, te definiranje svih bitnih parametara za proces ispisa. To su: rezolucija, brzina ispisa, gustoća, vrsta materijala, boja, itd. Nakon toga se izlazna datoteka iz programa za pripremu učitava u sam stroj putem LAN (engl. „*Local Area Network*“) mreže ili putem prijenosne memorije.

Četvrta faza izrade odnosi se na samu pripremu stroja nakon čega započinje proces ispisa (peta faza). S obzirom da su svi parametri prethodno definirani, postupak izrade nije potrebno kontinuirano nadgledati ali je važno osigurati kontinuirani izvor energije i materijala.

Šesta faza izrade podrazumijeva vađenje izrađenog dijela iz uređaja. U ovom dijelu treba voditi računa o sigurnosnim mjerama uređaja koji onemogućavaju pristup dijelu zbog previsokih temperatura ili drugih okolnosti koje bi mogle utjecati na zdravlje operatera.

⁴¹ Horvat, M; **Pregled aditivnih postupaka proizvodnje**; Završni rad br 188/PS/2016; str. 5.

U sedmoj fazi se vrši naknadna obrada izrađenog dijela. To može biti čišćenje, površinska-strojna obrada, brušenje, toplinska obrada, bojanje, itd. Ukoliko je dio rađen upotrebom podupora, isti se prije daljnje obrade treba ukloniti.

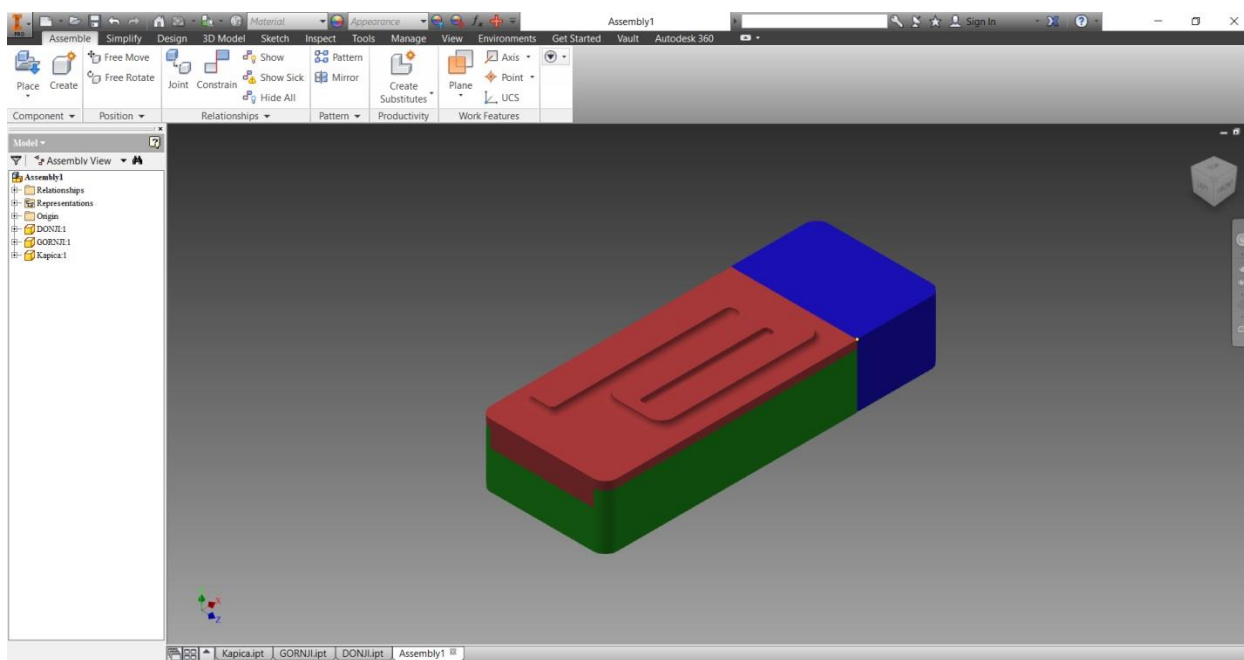
Osma faza podrazumijeva upotrebu gotovog dijela.⁴²

⁴² Gibson I, Rosen D.W., Stucker B.; **Additive Manufacturing Technologies**; Springer Science; New York; 2010. str. 5.

7. PRAKTIČNI PRIMJER – IZRADA KUĆIŠTA USB PRIJENOSNE MEMORIJE

U ovom dijelu rada opisan je postupak izrade kućišta USB prijenosne memorije prikazanog na slici 17. Kućište je napravljeno sa ciljem izrade funkcionalnog prototipa.

Kako je opisano u prethodnom poglavlju, u prvom koraku je bilo potrebno napraviti 3D model kućišta pomoću nekog od nekomercijalno ili komercijalno dostupnih CAD programskih sustava. Za izradu ovog primjera korišten je Autodesk Inventor 2015.⁴³ Nakon toga je izvršena konverzija 3D modela u STL datoteke te su iste učitane u programski sustav Cura za pripremu ispisa. Nakon što su se definirali svi parametri izrade, izlazne datoteke (g-code) su učitane u uređaj za ispis Ultimaker 2 Extended+, te je pokrenut postupak izrade.



Slika 17: Prikaz modela kućišta

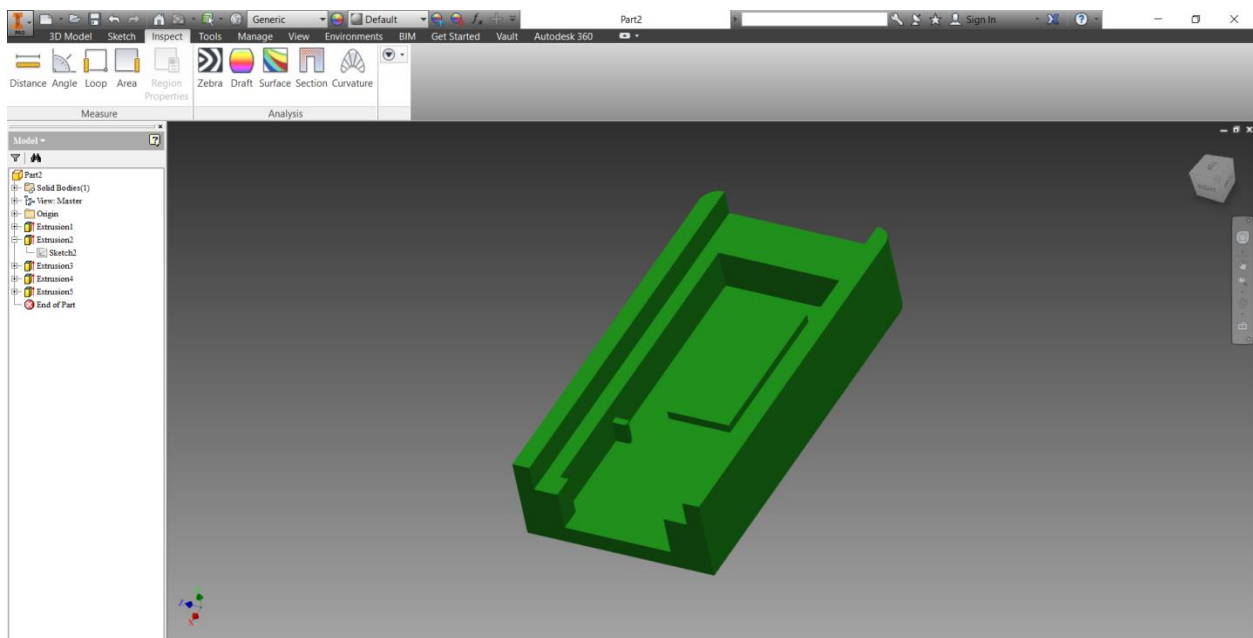
Izvor: Izrada autora

Slika 17 prikazuje model kućišta prikazanog u tri boje, svaka boja predstavlja jedan dio kućišta.

⁴³ Autodesk; <https://www.autodesk.com/> (11. 09. 2017.)

7.1 Izrada CAD modela

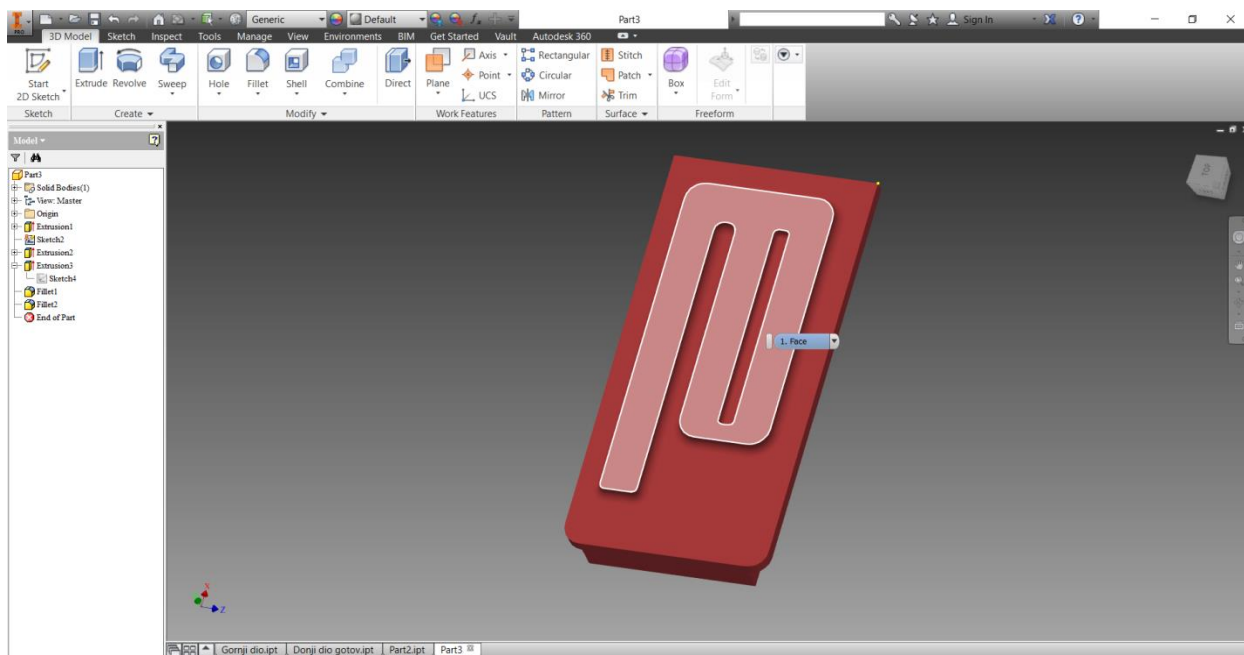
Kako bi se omogućila ugradnja memorijskog modula, kućište je bilo potrebno napraviti iz više dijelova. Dva dijela se odnose na samo tijelo USB prijenosne memorije, a jedan dio se odnosi na poklopac koji štiti konektor. 3D modeli dijelova kućišta su prikazani na slikama 18, 19, i 20.



Slika 18: Prikaz 3D modela donjeg dijela kućišta

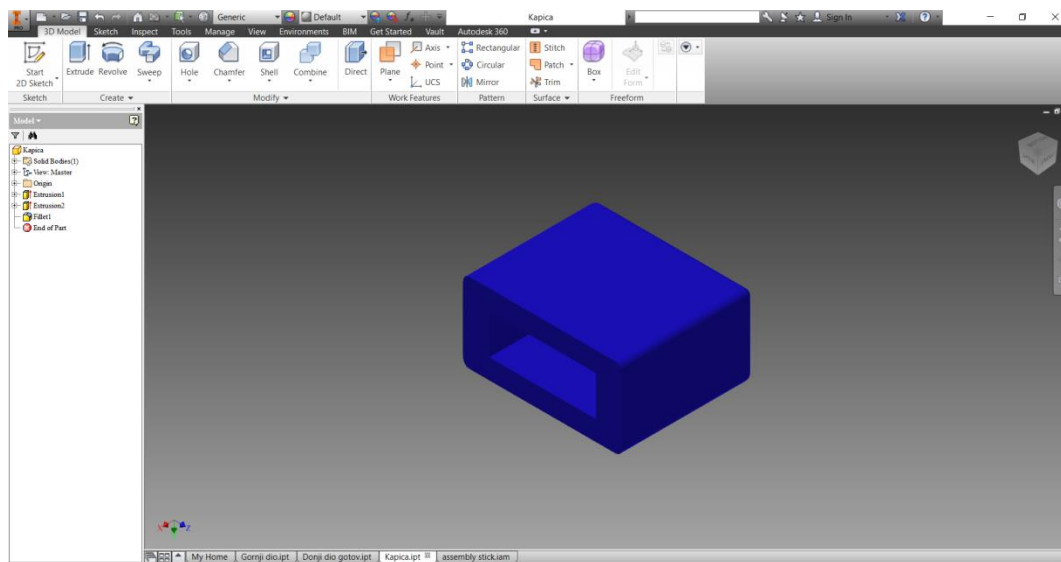
Izvor: Izrada autora

Na slici 18 je osim samog 3D modela prikazano i standardno grafičko korisničko sučelje programskog sustava Autodesk Inventor. Sa lijeve strane se uočava stablo modela koje ima jako važnu ulogu u samom procesu modeliranja dijela, te eventualno u kasnijim fazama modifikacije.



Slika 19: Prikaz 3D modela gornjeg dijela kućišta

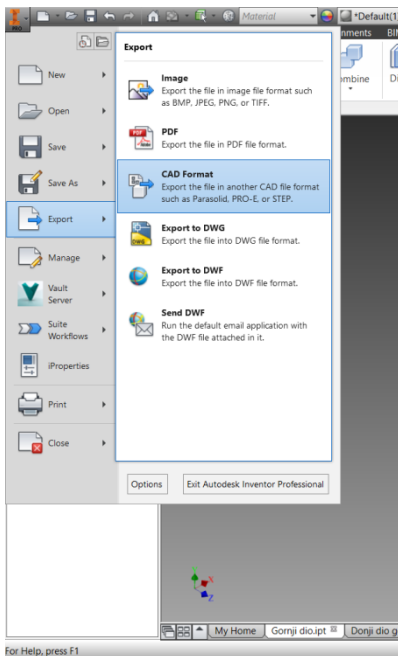
Izvor: Izrada autora



Slika 20: Prikaz 3D modela kapice kućišta

Izvor: Izrada autora

Nakon izrade 3D modela, datoteke su iz Inventor IPT formata konvertirane u STL datoteke. Ovo je napravljeno korištenjem opcije Ikone Inventora->Export->CAD Format, te je u podizborniku odabrana izlazna datoteka STL (slika 21).



Slika 21: Prikaz izbornika za konverziju datoteke

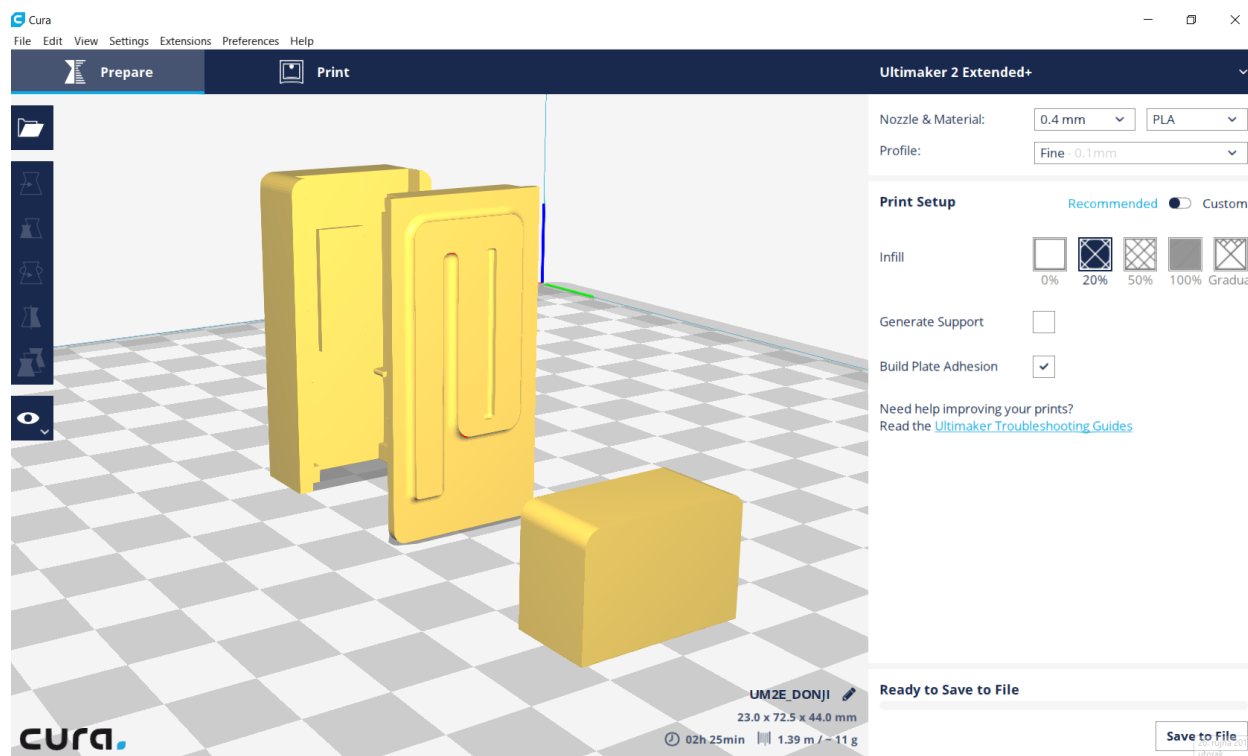
Izvor: Izrada autora

7.2 Izrada dijelova kućišta pomoću Ultimaker 2 Extended+ pisača

Nakon izrade CAD modela i konverzije u STL datoteke, slijedi otvaranje istih pomoću navedenog programa Cura verzije 2.7.0. Navedeni program besplatno je preuzet sa internet stranice proizvođača.⁴⁴ Sa takvim programom omogućeno je određivanje debljine sloja po z – osi, količine potrebnog materijala, vremena izrade i kvalitetu izrade gdje grublja i nezgrapnija površina zahtjeva manji udio vremena, a povećanjem vremena izrade proizvod ima finiju površinu. Pomoću programa postavke stroja podešene su kako bi se minimizirale greške pri

⁴⁴ Ultimaker; **Cura Software**; <https://ultimaker.com/en/products/cura-software> (12. 09. 2017.)

izradi prototipa. Prilikom podešavanja koristile su se specifikacije stroja kao i priručnik za korištenje koje se također mogu preuzeti besplatno putem internet stranice proizvođača.⁴⁵



Slika 22: Prikaz sučelja programa Cura

Izvor: Izrada autora

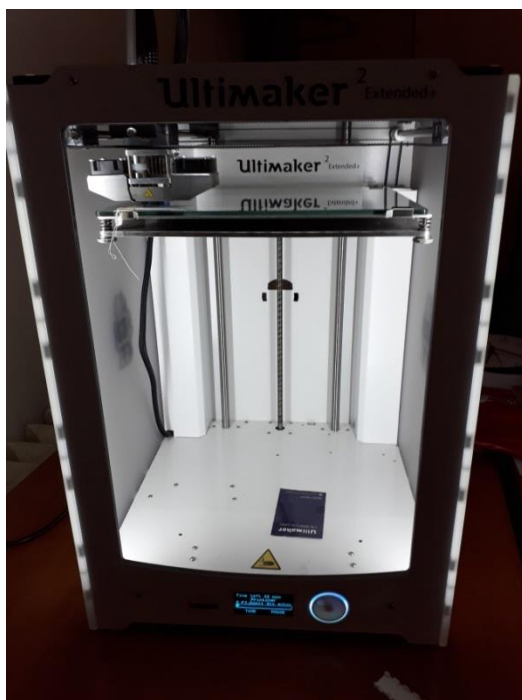
Na slici 22 prikazano je sučelje programa Cura Software-a na kojem su vidljive opcije za postavke izrade željenog prototipa. S lijeve strane slike alatna traka nudi izbor za učitavanje STL datoteke, te za manipulaciju modela poput skaliranja, rotacije, pomicanje na željeno mjesto radne ploče itd., dok su sa desne strane ponuđene opcije za debljinu sloja, odabir veličine mlaznice itd. U donjem desnom kutu prikazane su sveukupne dimenzije i predviđeno vrijeme izrade.

Prilikom podešavanja postavki i pripreme za izradu većina parametra postavljeno je na tvorničke postavke. Potom je odabrana opcija „*plate adhesion raft*“ (kako bi se izradio podupor) i podešena na visinu od 5 mm kako bi se uštedjelo na materijalu i skratilo vrijeme izrade. Svi

⁴⁵ Ultimaker; **Ultimaker²+ extended User Manual**; <https://ultimaker.com/download/7386/UserManual-UM2Extended-v2.1.pdf> (12. 09. 2017.)

izradci skalirani su za deset puta veću mjeru, kako bi odgovarala realnim fizičkim izmjerama. Izradak je na printeru pomaknut što bliže kutu radne podloge kako bi se nalazio bliže vijku za podešavanje ispod radne ploče čime se dostiže veća stabilnost i samim time smanjenje broja grešaka pri izradi.

Prije prebacivanja STL datoteke s pomoću memorijske kartice, potrebno je prvo kalibrirati stroj. Kalibracija se odrađuje po smjernicama iz uputa te uz pomoć mjernog listića kako bi se potvrdila visina glave naspram radne ploče. Stroj i mjerni listić prikazani su na slici 23. Nakon kalibracija slijedi faza izrade prototipa.



Slika 23: Prikaz stroja Ultimaker 2 Extended+ i mjerni listić

Izvor: Izrada autora

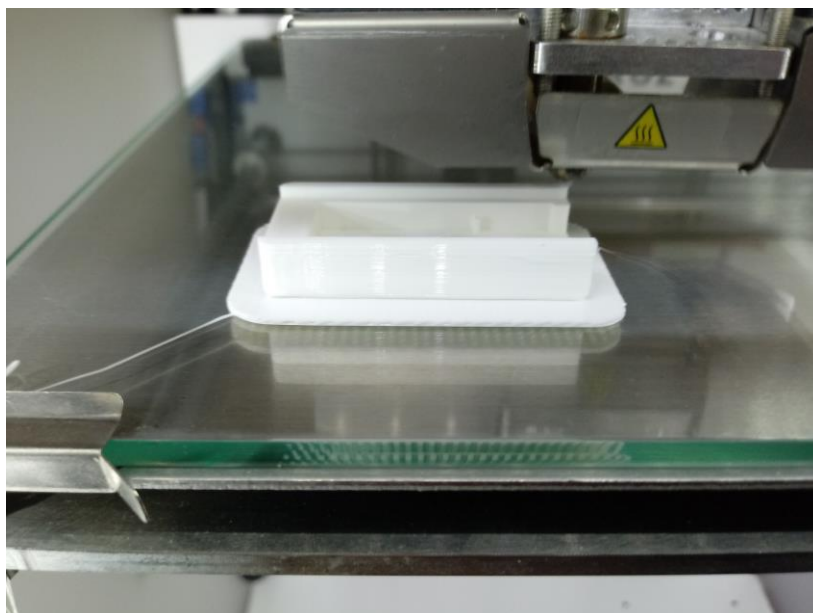
Funkcionalni prototip je izrađen korištenjem stroja Ultimaker 2 Extended+ koji radi na principu FDM tehnologije ispisa. Ultimaker 2 Extended+ je unaprijeđen u odnosu na prethodnu verziju povećanjem fizičkih gabarita tj. povećanom volumena radnog prostora, kvalitetnijim materijalima koji su korišteni za izradu stroja, itd. Kućište USB prijenosne memorije izrađeno je korištenjem PLA plastike. Za izradu je korištena mlaznica promjera 0,4 mm. U tablici 9 prikazane su specifikacije uređaja.

Tehnologija	Taložno očvršćivanje (FDM)
Materijal	PLA, ABS, CPE, CPE+, PC, Najlon, TPU 95A i PP
Promjer žice (materijala)	2,85 mm
Rezolucija	0,25 mm mlaznica: 150 – 60 μm 0,40 mm mlaznica: 200 – 20 μm 0,60 mm mlaznica: 400 – 20 μm 0,80 mm mlaznica: 600 – 20 μm
Vanjske dimenzije pisača	342x357x488 mm
Radni prostor (veličina izratka)	223 x 223 x 305 mm
Brzina ispisa	0,25 mm mlaznica: do 8 mm^3/s 0,40 mm mlaznica: do 16 mm^3/s 0,60 mm mlaznica: do 23 mm^3/s 0,80 mm mlaznica: do 24 mm^3/s
X, Y, Z preciznost	12,5, 12,5, 5 μm
Debljina slojeva	do 20 μm
Preporučeni promjer materijala	3 mm
Promjer mlaznice	0,25, 0,40, 0,60, i 0,80 mm
Radna temperatura grijanja mlaznice	180 – 260 °C
Radna temperatura radne podloge	50 - 100 °C
Masa pisača	12,3 kg
Softver	Cura (Službeni program)
Prijenos podataka	SD memorijska kartica
Razina buke	50 dBA
Preporučena temperatura radne okoline	15 - 32 °C
Cijena	~ € 2.495,00

Tablica 9: Specifikacije 3D pisača Ultimaker 2 Extended+

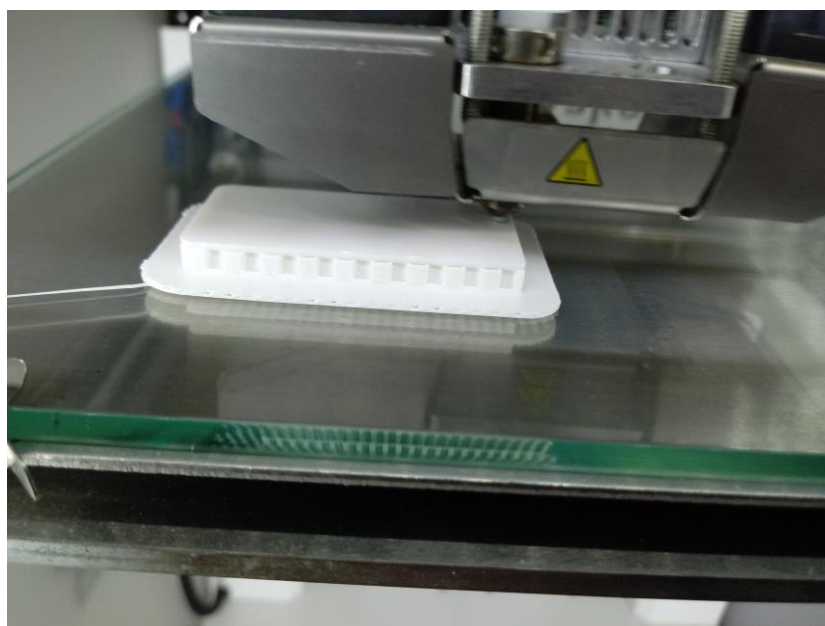
Izvor: Izrada autora; **Ultimaker 2 extended + specification;** <http://tinyurl.com/y86j58fz> (20. 09. 2017.)

Na slici 24, 25 i 26 prikazani su dijelovi prototipa nakon izgradnje.



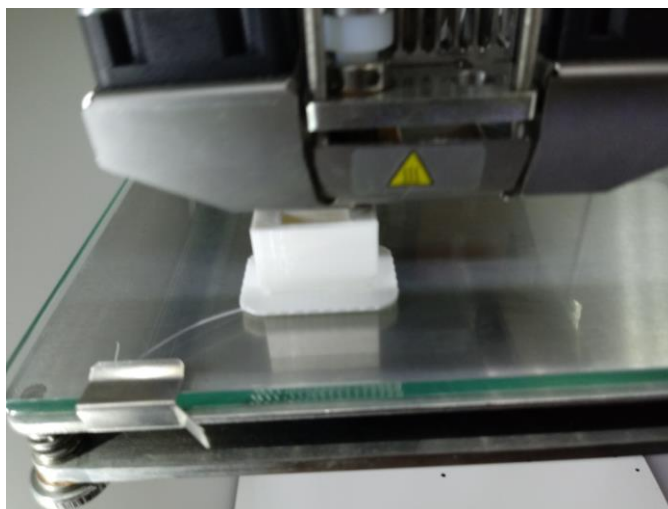
Slika 24: Izrada donjeg dijela kućišta

Izvor: Izrada autora



Slika 25: Izrada gornjeg dijela kućišta

Izvor: Izrada autora



Slika 26: Izrada kapice kućišta

Izvor: Izrada autora

Po završetku izrade, potrebna je površinska obrada odvajanjem čestica tj. brušenje. Brušenje se odradilo uz pomoć grubljeg brusnog papira kako bi se izravnala površina te sa finijim kako bi se izgladila površina. Nakon obrade, korištena je tekućina na bazi alkohola kako bi se odstranile sitne čestice materijala nastale nakon postupka brušenja.

Ugradnjom memorijskog modula u izrađeno kućište završena je izrada funkcionalnog prototipa, USB prijenosne memorije. Gotov proizvod je prikazan na slici 27.



Slika 27: Sklopljen funkcionalan prototip

Izvor: Izrada autora

8. ZAKLJUČAK

Primjenom aditivne tehnologije u svrhu izrade proizvoda, prototipa, funkcionalnih dijelova ili alata relativno je novi način proizvodnje. Postupci aditivne tehnologije pri proizvodnji pružaju jednostavan, učinkovit, brz i jeftin način izrade. Kontinuirani razvoj aditivne proizvodnje rezultira činjenicom da se primjena iste koristi u sve većem broju industrija i u sve većem postotku u odnosu na konvencionalne načine izrade (lijevanje, kovanje, obrada odvajanjem čestica, itd.). Najveći nedostatak aditivne proizvodnje je visoka cijena profesionalnih-industrijskih uređaja za 3d ispis te visoka cijena materijala koji se koriste u određenim postupcima. Međutim, kontinuirani razvoj 3d pisača te sve veći broj proizvođača istih rezultira time da se cijena profesionalnih uređaja ipak postepeno smanjuje te time postaje dostupnija sve većem broju korisnika.

Cilj ovog rada je bio ukratko predstaviti razvoj aditivne proizvodnje te sistematizirati postojeće aditivne tehnologije i materijale koji se mogu koristiti za 3d ispis. Osim toga, zadaća je bila na jednom jednostavnom primjeru prikazati postupak izrade dijela korištenjem aditivne proizvodnje.

Funkcionalni prototip USB prijenosne memorije je izrađen korištenjem uređaja Ultimaker 2 Extended+ i CAD programskog sustava Autodesk Inventor 2015.

LITERATURA

Knjige:

1. Forster, A; **Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability**; National Institute of Standards and Technology; Gaithersburg; 2015.
2. Gibson I, Rosen D.W., Stucker B.; **Additive Manufacturing Technologies**; Springer Science; New York; 2010.
3. Godec D, Šercer M; **Aditivna proizvodnja**; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015.
4. Šercer M., Križan B., Basan R.; **Konstruiranje polimernih proizvoda**; Sveučilište u Zagrebu – Fakultet strojarstva i brodogradnja; Zagreb, 2008.

Publikacija:

1. Alabdullah, F.; **Fused Deposition Modeling (FDM) Mechanism**; International Journal of Scientific & Engineering Research; Vol. 7; Broj 5.; Svibanj 2016.

Završni rad:

1. Horvat, M.; **Pregled aditivnih postupaka proizvodnje**; Završni rad br. 188/PS/2016;
2. Vadas, I.; **Aditivne tehnologije u medicini**; završni rad; oznaka i redni broj rada 30/2016; završni rad SFSB; 2016;

Internet izvori:

1. Autodesk; <https://www.autodesk.com/> (11. 09. 2017.)
2. Autodesk Inventor; <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview#> (11. 09. 2017.)
3. EOS-manufacturing; <http://tinyurl.com/y7hqw5j5> (10.09.2017.)
4. FileInfo; .IPT File Extension; <https://fileinfo.com/extension/ipt> (12. 09. 2017.)
5. FileInfo; .STL File Extension; <https://fileinfo.com/extension/stl> (12. 09. 2017.)
6. Salmi, M; **Patient-specific reconstruction with 3D modeling and DMLS additive manufacturing; Emerald Group Publishing**; <https://tinyurl.com/y7jogd9n> (10. 09. 2017)
7. Sames, W.; **The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing**; ISSN 1743-2804; <http://tinyurl.com/yde4s4gw> (01.09. 2017.)
8. SOLIDFILL 3D Printing Solutions; Fused Deposition Modeling; <http://solidfill.com/wp-content/uploads/2014/11/FDM1.png> INTERNET(26.08.2017.)
9. Vision-Systems; <https://tinyurl.com/ya4f6jst> (01.09.2017.)
10. Ultimaker; Ultimaker^2+ extended User Manual; <https://ultimaker.com/download/7386/UserManual-UM2Extended-v2.1.pdf> (12. 09. 2017.)
11. Ultimaker 2 extended + specification; <http://tinyurl.com/y86j58fz> (20. 09. 2017.)
12. Wohlers T.; **Rapid prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry**; Wohlers Associates, INC; 2005.
<http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2015/NIST.IR.8059.pdf> (25. 08. 2017.)
13. Wohlers T.;Garnett T.; **History of additive manufacturing**; Wohlers Associates, INC., 2014. <http://wohlersassociates.com/history2014.pdf> (25. 08. 2017.)

POPIS SLIKA I TABLICA

Popis slika:

Slika 1: Sistematizacija tehnologije aditivne proizvodnje	7
Slika 2: Princip SLA postupka	8
Slika 3: Princip rada SLS postupka.....	10
Slika 4: Proces 3D tiskanja – shematski prikaz.....	12
Slika 5: FDM postupak	14
Slika 6: Postupak LOM-a	15
Slika 7: Prikaz SLM tehnologije	17
Slika 8: Prikaz EBM postupka	20
Slika 9: Primjena i razvoj polimernih materijala	22
Slika 10: Korištenje materijala u primjeni aditivne tehnologije	23
Slika 11: Područja primjene aditivne proizvodnje	27
Slika 12: CAD model i izrađena kost.....	28
Slika 13: Implementirano rješenje na pacijentu	28
Slika 14: Turbina izrađena primjenom AP.....	29
Slika 15: Izrađeni dijelovi automobila	30
Slika 16: Proces izrade dijela primjenom aditivne proizvodnje.....	31
Slika 17: Prikaz modela kućišta	34
Slika 18: Prikaz 3D modela donjeg dijela kućišta.....	35
Slika 19: Prikaz 3D modela gornjeg dijela kućišta	36
Slika 20: Prikaz 3D modela kapice kućišta.....	36
Slika 21: Prikaz izbornika za konverziju datoteke	37
Slika 22: Prikaz sučelja programa Cura	38
Slika 23: Prikaz stroja Ultimaker 2 extended+ i mjerni listić	39
Slika 24: Izrada donjeg dijela kućišta	41
Slika 25: Izrada gornjeg dijela kućišta	41
Slika 26: Izrada kapice kućišta.....	42
Slika 27: Sklopljen funkcionalan prototip.....	42

Popis tablica:

Tablica 1: Prednosti i nedostaci SLA postupka	9
Tablica 2: Prednosti i nedostaci SLS postupka	11
Tablica 3: Prednosti i nedostaci 3DP postupka.....	13
Tablica 4: Prednosti i nedostaci FDM postupaka	15
Tablica 5: Prednosti i nedostaci LOM postupaka.....	16
Tablica 6: Prednosti i nedostaci SLM postupaka	18
Tablica 7: Razlike između EBM i SLM postupaka	19
Tablica 8: Prednosti i nedostaci EBM postupaka	21
Tablica 9: Specifikacije stroja Ultimaker 2 extended+.....	40